

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie électrique et de génie informatique

Revêtements antireflet-passivation à base de
nitrure de silicium PECVD pour cellules
solaires triple-jonction III-V/Ge

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie électrique

Ram HOMIER

Jury : Vincent AIMEZ (directeur)
Abdelatif JAOUAD (co-directeur)
Richard ARÈS
Denis MORRIS

Sherbrooke (Québec) Canada

08 2012

IV - 2246



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-91679-7

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-91679-7

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

Pour tirer le meilleur parti des connaissances acquises, pour en extraire toute la richesse, il importe de ne pas s'y habituer trop vite, de se laisser le temps de la surprise et de l'étonnement.

Hubert Reeves - Extrait de L'Espace prend la forme de mon regard

Estimer correctement son degré d'ignorance est une étape saine et nécessaire.

Hubert Reeves - Extrait de Patience dans l'azur

RÉSUMÉ

Dans le contexte environnemental actuel, le photovoltaïque bénéficie de l'augmentation des efforts de recherche dans le domaine des énergies renouvelables. Pour réduire le coût de la production d'électricité par conversion directe de l'énergie lumineuse en électricité, le photovoltaïque concentré est intéressant. Le principe est de concentrer une grande quantité d'énergie lumineuse sur des petites surfaces de cellules solaires multi-jonction à haute efficacité. Lors de la fabrication d'une cellule solaire, il est essentiel d'inclure une méthode pour réduire la réflexion de la lumière à la surface du dispositif. Le design d'un revêtement antireflet (ARC) pour cellules solaires multi-jonction présente des défis à cause de la large bande d'absorption et du besoin d'égaliser le courant produit par chaque sous-cellule. Le nitrure de silicium déposé par PECVD en utilisant des conditions standards est largement utilisé dans l'industrie des cellules solaires à base de silicium. Cependant, ce diélectrique présente de l'absorption dans la plage des courtes longueurs d'onde. Nous proposons l'utilisation du nitrure de silicium déposé par PECVD basse fréquence (LFSiN) optimisé pour avoir un haut indice de réfraction et une faible absorption optique pour l'ARC pour cellules solaires triple-jonction III-V/Ge. Ce matériau peut aussi servir de couche de passivation/encapsulation. Les simulations montrent que l'ARC double couche $\text{SiO}_2/\text{LFSiN}$ peut être très efficace pour réduire les pertes par réflexion dans la plage de longueurs d'onde de la sous-cellule limitante autant pour des cellules solaires triple-jonction limitées par la sous-cellule du haut que pour celles limitées par la sous-cellule du milieu. Nous démontrons aussi que la performance de la structure est robuste par rapport aux fluctuations des paramètres des couches PECVD (épaisseurs, indice de réfraction).

Mots-clés : Photovoltaïque concentré (CPV), cellules solaires multi-jonction (MJSC), revêtement antireflet (ARC), passivation des semiconducteurs III-V, nitrure de silicium (Si_xN_y), PECVD

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au CRN2 (Centre de Recherche en Nanofabrication et Nano-caractérisation) sous la direction de Vincent Aimez et Abdelatif Jaouad, professeurs au département de génie électrique et de génie informatique de l'Université de Sherbrooke.

Je souhaite exprimer ma gratitude et mon respect envers Vincent Aimez pour son soutien et sa vision pour guider ce projet de maîtrise depuis le début. De plus ce travail n'aurait pu être accompli sans le soutien, les conseils et l'encadrement technique et scientifique continus d'Abdelatif Jaouad et j'en suis sincèrement reconnaissant.

Je remercie Denis Morris, professeur au Département de physique de l'Université de Sherbrooke, et Richard Arès, professeur au Département de génie mécanique de l'Université de Sherbrooke, d'avoir accepté de participer au jury de ce mémoire. De plus, je souhaite souligner ma reconnaissance envers Denis Morris pour m'avoir guidé vers ce groupe de recherche en CPV au CRN2 il y a quelques années.

Je tiens à souligner l'importance de la collaboration avec Cyrium Technologies Inc. dans le succès de ce projet. Les discussions et les échanges que j'ai eues avec Christopher E. Valdivia ont été particulièrement enrichissantes.

Je remercie aussi le personnel du CRN2 pour leur soutien.

Finalement, je remercie mon épouse Vanessa et ma famille pour leur support durant toutes les étapes de mon cheminement scolaire et universitaire.

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	1
2	Cellules solaires III-V pour le CPV	5
2.1	Photovoltaïque concentré	5
2.2	Revêtement antireflet	10
2.2.1	ARC pour cellules solaires simple jonction	10
2.2.2	ARC pour cellules solaires multi-jonction	13
3	Réflexion et transmission de la lumière	17
3.1	Réflexion à une interface	17
3.2	Couche transparente sur un substrat	18
3.3	Structure multicouche	20
4	Simulation des ARC pour cellules solaires	23
4.1	Spectre solaire	23
4.2	Propriétés optiques des matériaux	25
4.3	Calcul de $T(\lambda)$ et $R(\lambda)$	27
4.4	Efficacité quantique et courant de court circuit	28
4.5	Algorithme d'optimisation	29
5	ARC LFSiN/SiO₂ pour des 3JSC III-V/Ge	33
5.1	Introduction	36
5.2	ARC optimization	37
5.3	Results and discussions	41
5.3.1	Antireflection coating for 3JSCs	41
5.3.2	ARC's performance with varied parameters	44
5.4	Conclusion	46
6	Conclusion	47
A	Méthode matricielle et vecteur de Poynting	49
A.1	Onde plane et système de coordonnées	49
A.2	Réflexion et transmission à une interface	51
A.3	Méthode des matrices de transfert	52
A.4	Calcul du champ électrique dans une couche spécifique d'un empilement	53
A.5	Traitement du vecteur de Poynting et calcul de R, T et A	55
	LISTE DES RÉFÉRENCES	57

LISTE DES FIGURES

2.1	Records d'efficacité de conversion photovoltaïque compilés par NREL [NREL NCPV, 2012].	6
2.2	Schéma d'une cellule solaire triple-jonction III-V/Ge	8
2.3	a) Il y a une lentille de Fresnel pour chaque cellule solaire. b) Un panneau comprend plusieurs concentrateurs. c) Les panneaux sont installés sur des héliostats (<i>tracker</i>) à deux axes pour suivre la direction du soleil. [Concentrix Solar, 2011]	9
2.4	Concentrateur parabolique par réflexion [Solar Systems, 2011]	9
2.5	a) Spectres de transmittance pour des ARC double couches sur Si et b) Efficacité quantique d'une cellule simple jonction en Si avec le spectre de transmittance du silicium sans ARC en encart	10
2.6	Indice de réfraction du nitrure de silicium [Doshi <i>et al.</i> , 1997]	11
2.7	Coefficient d'extinction du nitrure de silicium [Doshi <i>et al.</i> , 1997]	11
2.8	Spectre de réflectance d'une 2L-ARC en $\text{SiO}_2\text{Si}_x\text{N}_y$ [Doshi <i>et al.</i> , 1997]	12
2.9	Surface d'une cellule solaire MIS en Si avec des motifs en pyramides aléatoires et passivée par une fine couche de Si_xN_y [Hezel, 1997]	13
2.10	Motifs en <i>moth-eye</i> dans une couche en résine acrylique [Yamada <i>et al.</i> , 2011].	13
2.11	Schéma de l'approche de l'équivalent Herpin pour imiter une ARC triple couche avec seulement deux matériaux différents [Aiken, 2000b].	14
2.12	Motifs en <i>moth-eye</i> de différentes dimensions (trois échantillons différents : A, B et C) sur une couche en AlInP crue sur un substrat de GaAs [Tommila <i>et al.</i> , 2010].	15
2.13	Spectres de transmittance de 2L-ARC pour comparer différents matériaux [Valdivia <i>et al.</i> , 2008].	16
3.1	Champ électrique à une interface entre un milieu d'indice n_0 et un milieu d'indice n_1 . E_I , E_R et E_T sont respectivement l'amplitude des champs électriques incident, réfléchi et transmis.	18
3.2	Champ électrique incident, réfléchi et transmis par une couche d'indice n_1 et d'épaisseur d_1 sur un substrat d'indice n_2	19
3.3	Champs électriques incident, réfléchi et transmis par une structure de j couches entre un milieu d'incidence d'indice n_0 et un substrat d'indice n_{j+1}	20
4.1	Spectres solaires AM1.5 direct, AM1.5 global et AM0 [NREL, 2012].	24
4.2	Spectre solaire AM1.5 direct en unités de flux de photons.	24
4.3	Indice de réfraction du LFSiN et du SiO_2 mesuré par ellipsométrie et extrapolé suivant le modèle de Cauchy ainsi que l'indice de réfraction d'autres matériaux utilisés dans ce travail (pour plus de détails voir la même figure dans le chapitre 5).	26
4.4	Coefficient d'extinction du LFSiN, du HFSiN et de l'AlInP (pour plus de détails voir la même figure dans le chapitre 5).	26
4.5	Algorithme pour calculer la réflectance d'une structure de m couches selon la méthode de Rouard.	27

4.6	Efficacité quantique interne de deux designs de 3JSC GaInP/InGaAs/Ge fournis par Cyrium Technologies Inc. comparée au spectre solaire AM1.5D. Lignes pleines : 3JSC limité par la sous-cellule du milieu. Lignes en tirets : 3JSC limité par la sous-cellule du haut.	28
4.7	Quelques points fictifs du spectre solaire pour illustrer la méthode de sommation pour calculer l'intégrale dans l'équation de J_{SC}	30
5.1	Typical structure of a 3JSC.	38
5.2	Refractive index of LFSiN and SiO ₂ measured by ellipsometry as well as the refractive index of the other materials used in this work.	40
5.3	Extinction coefficient of LFSiN and standard HFSiN measured by ellipsometry for comparison of the absorption as well as extinction coefficient of AlInP.	41
5.4	Internal quantum efficiencies of two GaInP/InGaAs/Ge 3JSC designs provided by Cyrium Technologies Inc. compared to the solar spectrum. Solid colored lines : ML-3JSC design. Dashed colored lines : TL-3JSC design.	42
5.5	Calculated reflectance spectrum and performance data of LFSiN 1L-ARC and SiO ₂ /LFSiN 2L-ARC optimized for the ML-3JSC design in (a) and for the TL-3JSC design in (b).	43
5.6	Calculated reflectance spectrum and performance data of SiO ₂ /LFSiN 2L-ARC matched with air and LFSiN 1L-ARC matched with glass, optimized for a 3JSC with current-matched top and middle subcells.	44
5.7	R_W of the middle subcell increase as a function of SiO ₂ and LFSiN thickness variation in the vicinity of the optimal values of 81 and 57 nm respectively.	45
5.8	R_W of the middle subcell increase as a function of SiO ₂ and LFSiN refractive index variation in the vicinity of the typical values.	45
A.1	Schéma d'un champ électrique incident sur une structure multicouche avec m couches dans le système de coordonnées cartésiennes. Le milieu 0 est le superstrat et le milieu $m+1$ est le substrat. Les flèches associées aux différents champs électriques montre la direction de propagation du champ (i.e. la direction du vecteur d'onde \mathbf{k}) et non la direction du champ électrique. $\mathbf{E}_j^+(0)$ est le champ électrique se propageant dans la direction des z positifs à l'interface de gauche de la couche j et $\mathbf{E}_j^+(d_j)$ à l'interface de droite; de façon similaire pour les champs se propageant dans la direction des z négatifs $\mathbf{E}_j^-(0)$ et $\mathbf{E}_j^-(d_j)$	50

LISTE DES TABLEAUX

5.1	Short-circuit current density that could be produced by each subcell under AM1.5D solar spectrum	41
5.2	Solar weighted reflectance over the range of the top subcell for different ARC structures	43

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition
A	Absorptance
d_x	Épaisseur d'une couche x
EQE	Efficacité quantique externe
E_I	Amplitude du champ électrique incident
E_R	Amplitude du champ électrique réfléchi
E_T	Amplitude du champ électrique transmis
I	Irradiance solaire
IQE	Efficacité quantique interne
J_{SC}	Densité de courant de court circuit
k_x	Coefficient d'extinction d'un milieu x
n_x	Indice de réfraction d'un milieu x
\mathbf{n}	Indice de réfraction complexe, $n - ik$
q	Charge électrique élémentaire
r_x	Coefficient de réflexion d'une interface x
R	Réflectance
R_W	Reflectance moyenne pondérée
\vec{S}	Vecteur de Poynting
t_x	Coefficient de réflexion d'une interface x
T	Transmittance
δ_x	Épaisseur optique d'une couche x
λ	Longueur d'onde

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
3JSC	<i>Triple-junction solar cell</i>
ARC	<i>Antireflection coating</i>
CPV	<i>Concentrated photovoltaic</i>
HFSiN	Si _x N _y standard déposé par PECVD haute fréquence
LFSiN	Si _x N _y à faible absorption déposé par PECVD basse fréquence
MJSC	<i>Multi-junction solar cell</i>
PECVD	<i>Plasma enhanced chemical vapor deposition</i>
PV	Photovoltaïque
UV	Ultraviolet

CHAPITRE 1

Introduction

Stimulés par les enjeux environnementaux actuels, c'est-à-dire la diminution des réserves de combustibles fossiles et le réchauffement planétaire, beaucoup d'efforts de recherche ont lieu dans le domaine des énergies renouvelables. Le soleil est une source d'énergie qui ne risque pas de s'épuiser avant des milliards d'années. Il est important ici de noter que la majorité des formes d'énergies renouvelables provient de l'énergie solaire. Même l'hydroélectricité est possible grâce à l'évaporation de l'eau sous la chaleur du soleil et l'électricité éolienne vient des déplacements de masses d'air causés par des différences de températures dans l'atmosphère.

Il y a cependant une forme d'énergie renouvelable plus directement liée à la lumière du soleil : le photovoltaïque (PV). En principe, le PV est la manière de convertir l'énergie solaire en électricité qui a le plus haut potentiel d'efficacité, car la conversion est directe. En guise de comparaison, le solaire thermique requiert de chauffer un liquide pour faire tourner un alternateur qui produit de l'électricité. En utilisant des structures de semiconducteurs (i.e. des cellules solaires) il est possible de convertir directement la lumière en électricité. Les photons incidents sur la cellule solaire interagissent directement avec les électrons du semiconducteur et le champ électrique interne de la jonction actionne ces électrons pour produire un courant électrique. Jusqu'à maintenant, la majorité des cellules solaires sont fabriquées par une diode en silicium. Ces dispositifs ont typiquement une efficacité de 10 à 15%, mais bien optimisées, ils peuvent atteindre une efficacité de 25%. Il faut noter que le rapport efficacité/coût est le critère le plus important, c'est-à-dire la quantité d'énergie électrique produite par unité d'énergie solaire incidente et par unité de coût de fabrication.

Le développement de panneaux photovoltaïques plus performants et moins coûteux pourrait permettre de mieux concurrencer la production d'énergie par combustibles fossiles. Présentement, la grande majorité de la production d'électricité par conversion PV a lieu en Allemagne, au Japon, aux États-Unis et en Espagne. Les installations photovoltaïques domestiques sont trop coûteuses et sont principalement présentes dans les pays où elles sont subventionnées. L'effort de recherche en énergie solaire cible donc l'augmentation de l'efficacité des cellules solaires de plusieurs types ainsi que le développement de dispositifs moins coûteux à fabriquer.

Afin de réduire le coût de fabrication des systèmes, le photovoltaïque concentré (CPV) est intéressant. En effet, au lieu de fabriquer une grande surface de cellules solaires, il est possible d'utiliser un concentrateur optique pour focaliser une grande quantité de lumière solaire sur une petite cellule. Avec un facteur de concentration X , il est possible de réduire la surface des cellules solaires nécessaire de X fois. Cela permet l'utilisation de cellules solaires à haute efficacité même si elle coûtent plus chère à fabriquer. Par cette pratique, le coût de l'installation est diminué dans la mesure où le coût par unité de surface du concentrateur (système optique de concentration et héliostat ou *tracker*) reste inférieur à celui de la cellule. Les cellules solaires à haute efficacité sont faites d'un empilement de plusieurs jonctions p-n de semiconducteurs différents et peuvent atteindre une efficacité de plus de 40%.

Parmi les facteurs qui influencent l'efficacité des cellules solaires, on distingue le ou les semiconducteurs utilisés, le nombre de sous-cellules ainsi que le procédé de fabrication. Étant donné que la lumière solaire est composée d'une grande plage de longueurs d'onde (entre 300 et 2000 nm principalement) et que chaque semiconducteur n'absorbe efficacement qu'une portion du spectre, le choix des semiconducteurs est fondamental en PV. Par exemple, les semiconducteurs III-V dont le GaAs et le GaInP permettent de fabriquer, sur un substrat de Ge, une cellule solaire triple-jonction (3JSC) dont l'efficacité de conversion dépasse n'importe quelle cellule solaire simple ou double-jonction. Chaque jonction (ou sous-cellule) absorbe efficacement une certaine portion du spectre solaire en partant des petites longueurs d'onde pour la sous-cellule du haut (semiconducteur à grand gap) jusqu'aux grandes longueurs d'ondes pour la sous-cellule du bas (semiconducteur à petit gap).

En PV ainsi que dans toutes les technologies impliquant l'interaction lumière-matière, le principe de la réflexion et transmission de la lumière à une interface entre deux milieux d'indice de réfraction différents est important. Dans le cas du PV, toute réflexion de lumière à la surface de la cellule réduit la quantité d'énergie disponible à absorber et donc réduit la performance du dispositif. De plus, la surface d'un semiconducteur réfléchit typiquement plus de 20% de la lumière incidente perpendiculairement. Il est donc essentiel d'inclure une méthode pour réduire la réflexion à la surface de la cellule (communément appelé revêtement antireflet ou ARC pour *antireflection coating*) dans le procédé de fabrication des cellules solaires.

L'objectif de ce travail de maîtrise est d'étudier le design d'ARC fabriqués à base de nitrure de silicium (Si_xN_y) déposé par PECVD pour des 3JSC III-V/Ge. Largement utilisé en PV simple jonction sur Si, le Si_xN_y standard présente de l'absorption dans l'UV ce qui le rend

moins intéressant que d'autres matériaux du point de vue de la performance optique des ARC pour les MJSC. Dans ce travail, le Si_xN_y déposé par PECVD basse fréquence (LFSiN pour *low frequency* PECVD Si_xN_y), technique développée par le groupe de recherche en 2008 [Gorin *et al.*, 2008], présente très peu d'absorption même dans l'UV. Ce travail vise aussi à expliquer les différentes considérations à prendre et les défis que pose le design et la simulation d'ARC pour des MJSC comparativement à des cellules solaires simple-jonction.

Tout d'abord, le chapitre 2 présente une revue de la technologie des cellules solaires multijonctions, des systèmes CPV et des techniques d'ARC pour le PV. Plus d'attention est portée sur les ARC pour MJSC et les matériaux utilisés. Ensuite, le chapitre 3 explique la théorie liée aux phénomènes de réflexion et de transmission optique à l'interface entre deux milieux d'indice différents, pour une couche mince transparente et pour un empilement de couches transparentes. La méthode de Rouard est utilisée au lieu de la méthode matricielle pour le calcul des propriétés optiques des empilement de couches minces, car elle est plus intuitive et pédagogique. Dans le chapitre 4, la procédure de simulation d'une ARC pour une MJSC est expliquée. Enfin, le chapitre 5 donne les résultats de la simulation d'ARC à base de LFSiN pour des 3JSC.

CHAPITRE 2

Cellules solaires III-V pour le photovoltaïque concentré

Depuis environ une décennie, la recherche et la production de systèmes CPV et PV en général sont en pleine expansion. Les chercheurs dans le domaine du PV doivent relever le défi de réduire le coût de production d'électricité par énergie solaire à des niveaux comparables (ou inférieurs) aux énergies plus conventionnelles comme l'hydroélectricité, les combustibles fossiles et le nucléaire. La solution passe par deux concepts clés : l'augmentation de l'efficacité de conversion PV et la réduction du coût de fabrication des systèmes. Par contre, les cellules solaires plus performantes sont normalement plus complexes à fabriquer et donc plus coûteuses. Le CPV semble être la solution avec le plus grand potentiel d'augmentation d'efficacité et de réduction de coût. En effet, en utilisant des systèmes optiques, la lumière est concentrée sur de petites surfaces de cellules solaires très performantes ($>40\%$ d'efficacité). Ces cellules sont faites à base de semiconducteurs III-V et leur procédé de fabrication est complexe. Les prochaines sections font états des principales technologies actuelles dans le domaine des cellules solaires à très haute efficacité et des méthodes de réduction des pertes par réflexion lumineuse.

2.1 Photovoltaïque concentré

Le principe du CPV date de la fin des années 1970 alors que des chercheurs du National Sandia Laboratories ont conçu un système CPV avec des lentilles de Fresnel en acrylique et des cellules solaires en silicium cristallin [Burgess et Pritchard, 1978]. Par contre, concentrer la lumière sur des cellules d'efficacité moyenne ne justifiait pas l'utilisation de tels systèmes. Ce n'est que depuis le développement des cellules solaires multi-jonction à base de semiconducteurs III-V que le CPV prend de plus en plus d'importance en recherche ainsi qu'en construction de centrales électriques.

Le CPV présente plusieurs avantages par rapport au PV fixe conventionnel. D'une part, puisque la lumière est concentrée à plusieurs centaines de fois l'irradiance du soleil (environ 1000 W/m^2 sur la terre), la surface de cellules solaires est proportionnellement réduite. Cela permet d'utiliser des cellules solaires à très haute efficacité qui seraient trop coûteuses

autrement et ainsi augmenter la capacité de production d'électricité pour un terrain de dimensions données. De plus, dans un cas théorique idéal, V_{oc} augmente proportionnellement au logarithme du facteur de concentration X . Et comme il est bien évident que J_{sc} augmente proportionnellement à X , l'efficacité de conversion d'une cellule solaire augmente comme $\ln(X)$. Cette dépendance de l'efficacité avec la concentration est différente dans un cas réel, car la résistance série, la résistance *shunt* et des phénomènes de recombinaisons et de température réduisent les performances de la cellule. L'efficacité augmente donc avec la concentration jusqu'à un certain facteur de concentration (typiquement 300 – 400 X) qui dépend de l'optimisation du dispositif. Une description plus détaillée de tous ces phénomènes est donnée dans la référence [Cotal *et al.*, 2009]. Enfin, un système CPV nécessite un héliostat, car l'ouverture numérique du concentrateur optique est très faible (typiquement $< 1^\circ$) [Jaus *et al.*, 2011]. En effet, plus le facteur de concentration est élevé, plus une erreur dans l'orientation du panneau résultera en une diminution d'efficacité, car la lumière sera concentrée à côté de la cellule solaire. Suivre la course du Soleil à l'avantage de permettre au système CPV de produire de l'électricité avec plus de constance durant la journée jusqu'au coucher du soleil et ainsi de mieux répondre à la grande demande d'énergie en début de soirée que le PV sans héliostat.

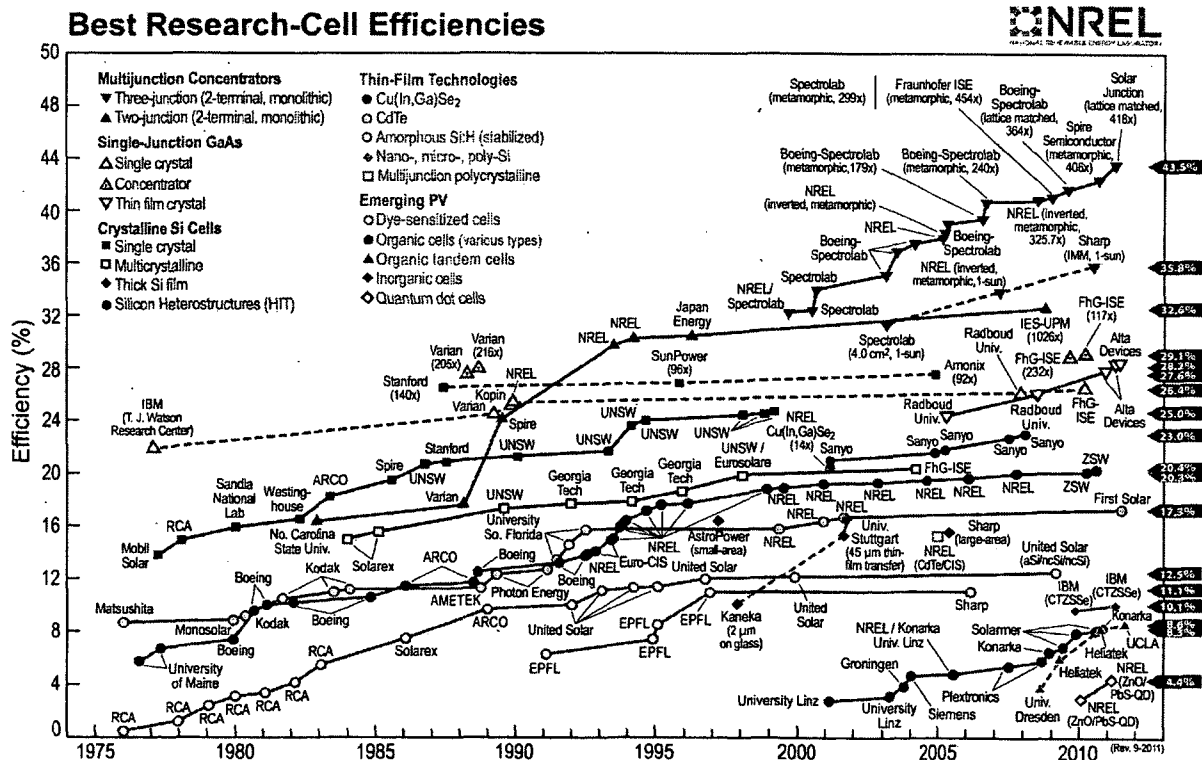


Figure 2.1 Records d'efficacité de conversion photovoltaïque compilés par NREL [NREL NCPV, 2012].

La figure 2.1 montre l'évolution de l'efficacité de conversion PV de tous les types de cellules solaires depuis 1975. Ce sont des records pour des cellules de type "recherches" (*best research-cell*), c'est-à-dire des dispositifs expérimentaux et non commerciaux. Ces données sont très utiles pour comparer les différents types de cellules solaires ainsi que pour étudier les derniers progrès en PV. Par exemple, on remarque que depuis de nombreuses années les cellules solaires en silicium multicristallin et cristallin semblent avoir atteint une certaine limite d'efficacité à 20.4% et 25.0%, respectivement. D'un autre côté, les cellules solaires multi-jonction (surtout les triple-jonction) pour le CPV sont beaucoup plus récentes, ont une efficacité significativement plus élevée et sont en évolution rapide.

Deux types de cellules solaires triple-jonction III-V (3JSC) se distinguent : les structures en accord de maille (*lattice matched*) et les structures en désaccord de maille (*metamorphic*). Les structures en désaccord de maille sont un empilement de semiconducteurs qui n'ont pas nécessairement exactement la même maille, mais qui ont des bandes interdites mieux adaptées au spectre solaire. Ainsi, ces cellules peuvent être légèrement plus efficaces, mais leur fiabilité à long terme restent incertaine à cause des défauts et dislocations provoqués lors de la croissance d'un semiconducteur sur un substrat qui n'a pas le même paramètre de maille. Un exemple notable est la cellule record InGaP/GaAs/InGaAs (42.3% en octobre 2010) de Spire Semiconductors. Ce groupe utilise une technique de croissance épitaxiale double face sur un substrat de GaAs [Wojtczuk *et al.*, 2010]. En d'autres termes, les jonctions du milieu et du haut sont crûes sur un substrat de GaAs puis le substrat est retourné pour croître la jonction du dessous. Ainsi, les défauts lors de la croissance de semiconducteurs en désaccord de maille se retrouvent seulement dans la jonction du dessous. Cette cellule a l'avantage de mieux séparer le spectre solaire que d'autres 3JSC, car les gaps des semiconducteurs sont mieux adaptés. Chaque sous-cellule produit environ le même courant de court-circuit à $\sim 14 \text{ mA/cm}^2$, contrairement aux 3JSC III-V/Ge pour lesquelles la jonction de Ge produit trop de courant.

Les cellules solaires multi-jonction en accord de maille sont typiquement crûes sur un substrat de Ge (GaInP/(In)GaAs/Ge). La figure 5.1 est une vue en coupe d'une telle structure. Ces dispositifs ont le principal avantage d'être sans défauts dans la structure cristalline des semiconducteurs. Le choix des matériaux pour chaque jonction est fait de manière à ce que toute la structure soit en accord de maille, mais les gaps ne sont pas optimaux. Ceci se traduit par un courant de court-circuit trop faible dans les jonctions de dessus et du milieu (typiquement de 12 à 13 mA/cm^2) et un potentiel interne trop faible pour la jonction de dessous en Ge dû à son gap trop petit. L'efficacité de ces dispositifs reste tout de même très élevé à plus de 40% sous concentration.

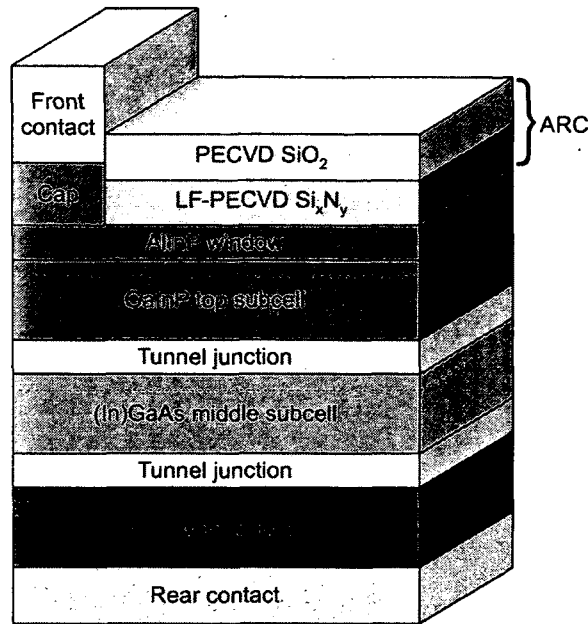


Figure 2.2 Schéma d'une cellule solaire triple-jonction III-V/Ge

Il est intéressant de noter que le tout dernier record d'efficacité à 43.5% par Solar Junction a été réalisé par une 3JSC en accord de maille, mais les gaps des semiconducteurs ont été ajustés par une technique de couches de semiconducteurs à nitrure dilué (par exemple GaInNAs) [Solar Junction, 2011]. Cependant, aucune autre information n'est divulguée concernant la technique de croissance épitaxiale ou la structure exacte de la cellule solaire.

Au delà du design et de la fabrication des cellules solaires, il y a l'aspect module dans les systèmes CPV (concentrateur, héliostat). Bien que l'efficacité des cellules dépasse 40%, l'efficacité du module dans son ensemble n'atteint pas 30%. Certaines pertes ont lieu dans le système optique (lentilles, miroirs) et d'autres pertes dans la conversion du courant DC en AC. Il y a deux principaux types de concentrateurs : par réflexion et par réfraction. La figure 2.3 montre un module typique pour un concentrateur par réfraction. Un des avantages de ce type de concentrateur est qu'il ne nécessite pas de refroidissement actif. La chaleur est dissipée passivement par le récepteur de chaque cellule. Le FLATCON CPV module de Concentrix Solar atteint une efficacité AC de 25% à un DNI de 850 W/m² et une efficacité AC moyenne sur 3 mois de 22% [Gombert *et al.*, 2010]. Ce module a été installé en 2009 à l'University College of San Diego en Espagne. Dans le cas d'un système CPV par réflexion gérer la chaleur doit normalement se faire différemment. La figure 2.4 montre un concentrateur par réflexion pour lequel un système de refroidissement actif est requis, car plusieurs cellules solaires sont très rapprochées au point focal de la parabole.

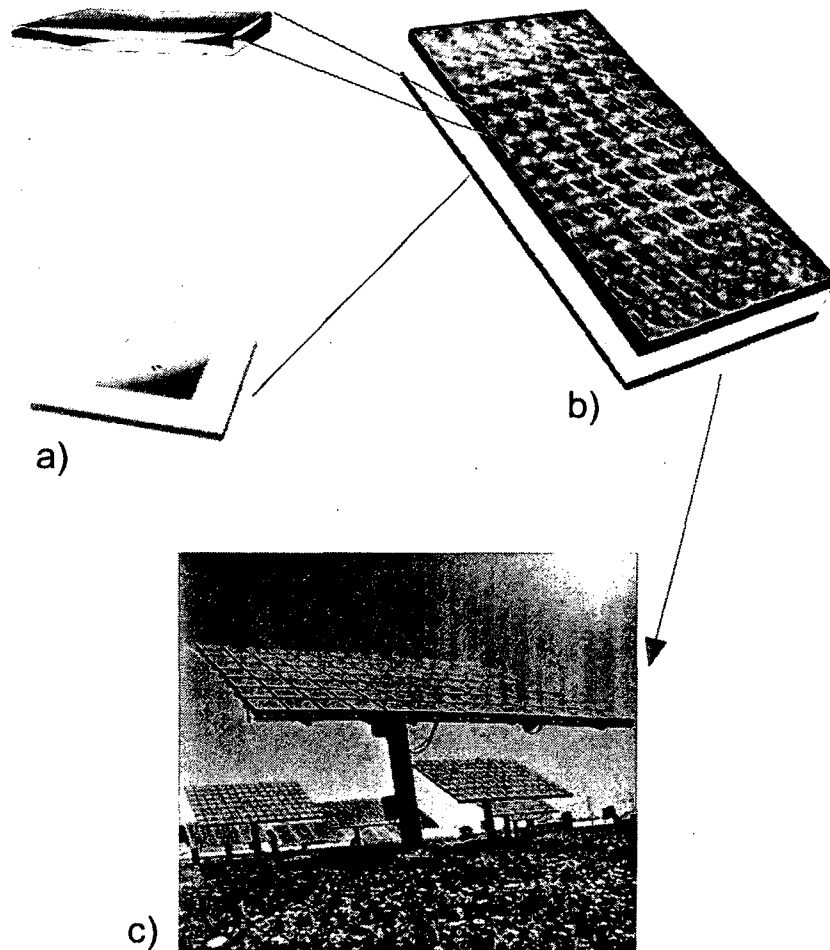


Figure 2.3 a) Il y a une lentille de Fresnel pour chaque cellule solaire. b) Un panneau comprend plusieurs concentrateurs. c) Les panneaux sont installés sur des héliostats (*tracker*) à deux axes pour suivre la direction du soleil. [Concentrix Solar, 2011]

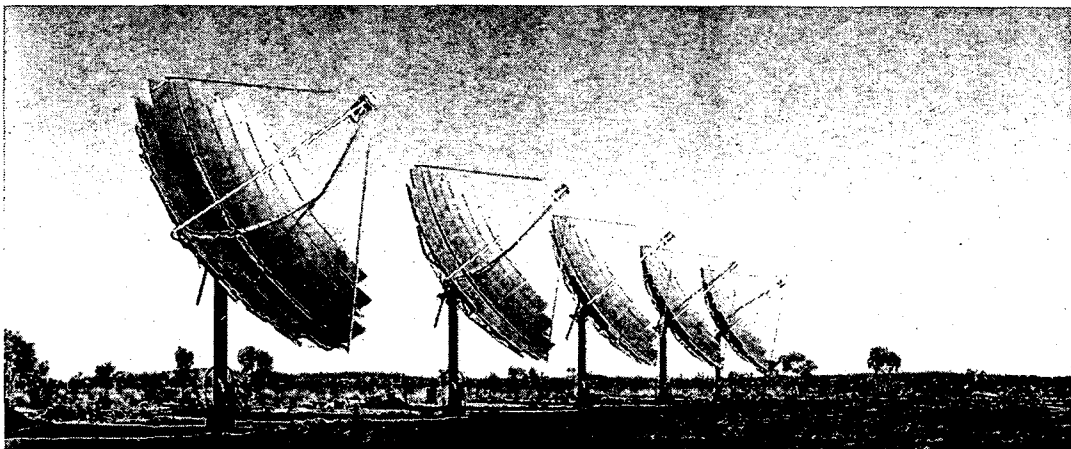


Figure 2.4 Concentrateur parabolique par réflexion [Solar Systems, 2011]

2.2 Revêtement antireflet

En plus du design de la cellule solaire multi-jonction comme faire le choix des matériaux et du nombre de jonction, plusieurs étapes de fabrication sont nécessaires pour rendre le dispositif utilisable : les contacts métalliques, la passivation, l'encapsulation, le revêtement antireflet et la découpe des cellules. L'optimisation du design et du procédé de fabrication de l'ARC est une étape clé, car non seulement l'ARC permet de minimiser les pertes par réflexion, mais aussi il peut servir de couche d'encapsulation/passivation. Dans les sections qui suivent, la conception et les principales techniques de fabrication d'ARC pour les cellules solaires simple jonction ainsi que pour les cellules solaires multi-jonction sont décrites.

2.2.1 ARC pour cellules solaires simple jonction

Le domaine du PV est dominé par les cellules solaires simple jonction en silicium qui ont bénéficié de la maturité de l'industrie du silicium. Selon leur qualité et leur type, elles peuvent avoir une efficacité de conversion jusqu'à plus de 20%. Comme les semiconducteurs qui composent la cellule ont un indice de réfraction plus élevé que l'air ($>3,4$ pour le Si), une technique pour réduire les pertes par réflexion à la surface est nécessaire. Deux méthodes peuvent être utilisées : i) recouvrir la cellule d'une fine couche d'un matériau transparent d'indice de réfraction intermédiaire entre celui de l'air et celui du semiconducteur, ii) texturer la surface du semiconducteur par des motifs de dimensions nanométriques (par exemple des pyramides). Parfois les deux méthodes sont utilisées conjointement.

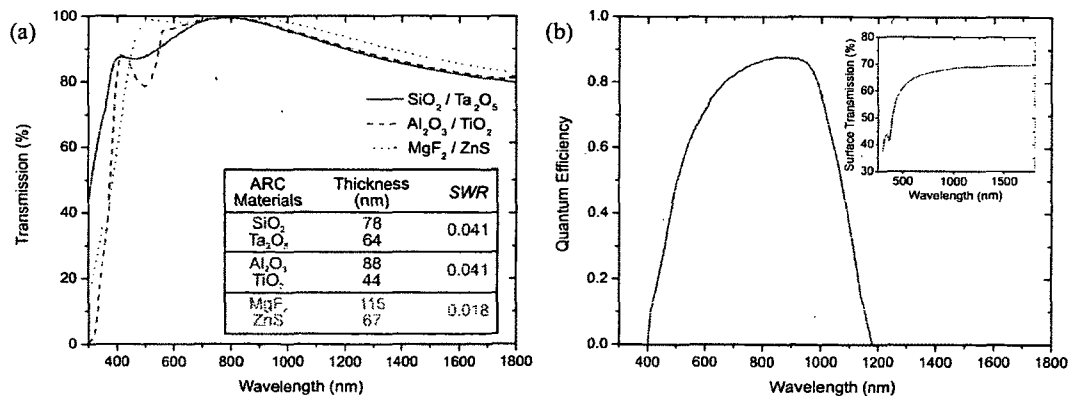
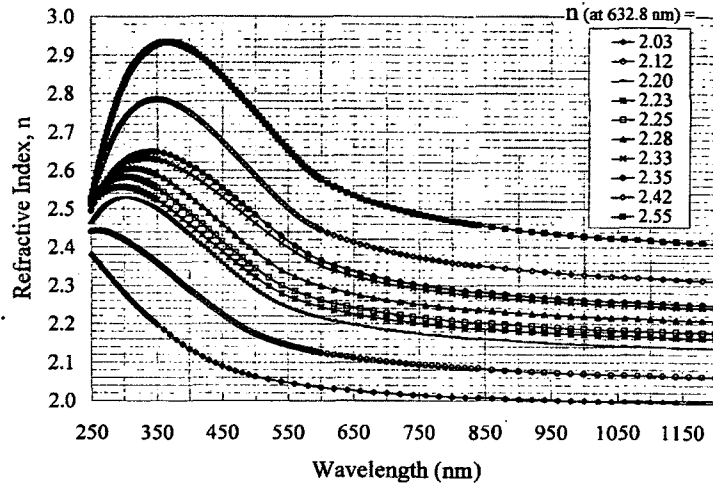
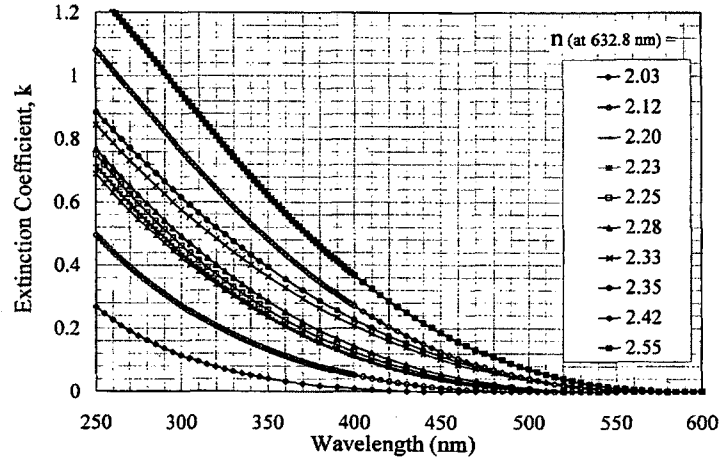


Figure 2.5 a) Spectres de transmittance pour des ARC double couches sur Si et b) Efficacité quantique d'une cellule simple jonction en Si avec le spectre de transmittance du silicium sans ARC en encart

Figure 2.6 Indice de réfraction du nitrure de silicium [Doshi *et al.*, 1997]Figure 2.7 Coefficient d'extinction du nitrure de silicium [Doshi *et al.*, 1997]

Premièrement, pour les ARC par dépôt de couches minces transparentes, la disponibilité de matériaux avec de bons indices de réfraction et une faible absorption est le principal obstacle. Valdivia [Valdivia *et al.*, 2008] compare la performance d'ARC double couche avec des matériaux typiques (figure 2.5). La meilleure combinaison de matériaux pour leurs propriétés optiques est MgF_2/ZnS , ARC qu'utilise d'ailleurs Spire Semiconductor [Wojtczuk *et al.*, 2010]. Par contre, Doshi *et al.* [Doshi *et al.*, 1997] mentionnent que ces matériaux n'offrent pas de barrière à l'humidité et de passivation de surface aussi efficacement que les matériaux PECVD comme le Si_xN_y et le SiO_2 . Ce groupe propose une 2L-ARC par PECVD avec du nitrure de silicium à 2.28 d'indice de réfraction et du SiO_2 à 1.46. Pour ce faire, l'indice de réfraction et le coefficient d'absorption du Si_xN_y sont étudiés pour obtenir un bon compromis entre un indice optimal de 2.55 et une faible

absorption (figures 2.6 et 2.7). En augmentant la quantité de Si dans le Si_xN_y , l'indice de réfraction augmente, mais le matériau devient de plus en plus absorbant surtout pour les petites longueurs d'onde. Ensuite, la réflectance d'une 2L-ARC est calculée pour le spectre typique d'une cellule solaire en Si, soit de 400 nm à 1100 nm, pour différents Si_xN_y (figure 2.8). Doshi *et al.* montrent que le Si_xN_y optimal a un indice de 2,28 à 632 nm.

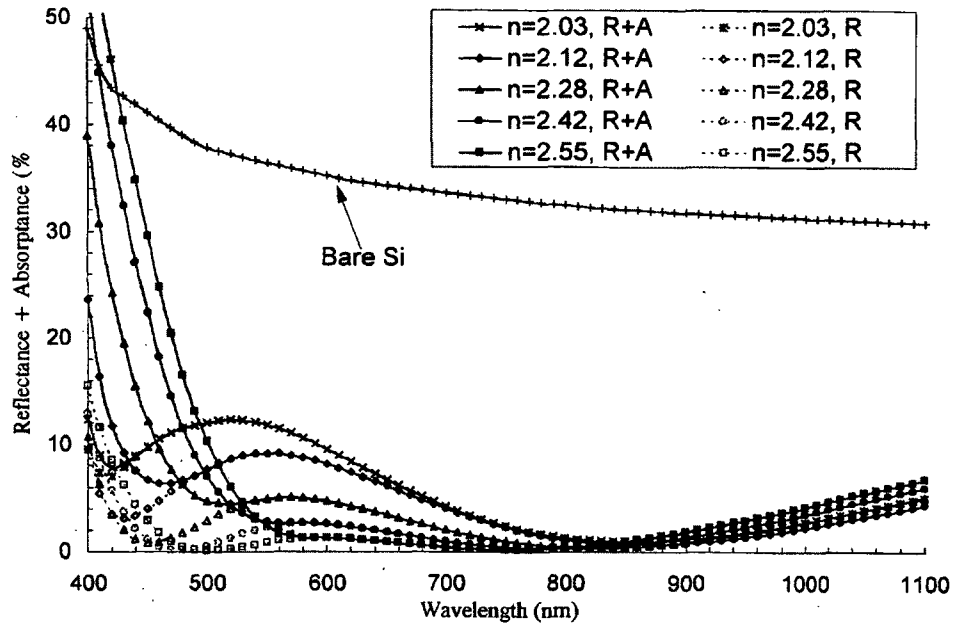


Figure 2.8 Spectre de réflectance d'une 2L-ARC en $\text{SiO}_2\text{Si}_x\text{N}_y$ [Doshi *et al.*, 1997]

Ensuite, pour obtenir un ARC plus performant autant sur une grande plage de longueurs d'onde que pour différents angles d'incidence, la texturisation de la surface est utilisée. Une méthode couramment utilisée consiste à créer des pyramides aléatoires sur la surface de Si (figure 2.9). Une couche de Si_xN_y est déposée sur les pyramides pour améliorer la performance de l'ARC et sert de passivation de la surface de Si. On remarque que quelques pyramides sont tronquées, révélant ainsi la surface du Si, pour permettre le contact métallique sur le dessus de la cellule.

Une autre approche consiste à déposer une fine couche transparente et d'y créer des motifs de dimensions nanométriques. Par exemple, un motif *moth-eye* tel que montré par la figure 2.10, inspiré d'un oeil de papillon de nuit, permet d'éliminer presque totalement la réflexion à l'interface entre l'air et un matériau. En effet, ces structures en cônes de dimensions plus petites que la longueur d'onde de la lumière incidente permettent de faire efficacement un gradient d'indice de réfraction effectif entre l'air et le matériau. De plus ce type d'ARC a une très large bande spectrale et est omnidirectionnel.

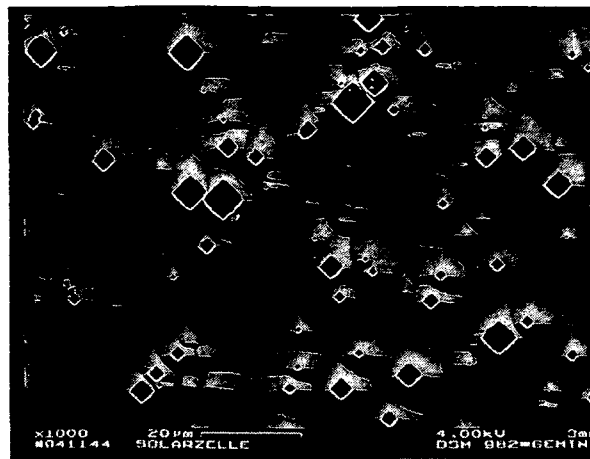


Figure 2.9 Surface d'une cellule solaire MIS en Si avec des motifs en pyramides aléatoires et passivée par une fine couche de Si_xN_y [Hezel, 1997]



Figure 2.10 Motifs en *moth-eye* dans une couche en résine acrylique [Yamada *et al.*, 2011].

2.2.2 ARC pour cellules solaires multi-jonction

Si l'optimisation de l'ARC pour les cellules solaires simple jonction a fait l'objet de nombreuses études, le domaine des MJSC est plus récent. Cependant, ce n'est pas suffisant d'utiliser directement les ARC pour cellules solaires simple jonction et de les appliquer aux MJSC. En effet, à cause de la structure et du fonctionnement plus complexes des MJSC, leur ARC requièrent un design parfois plus avancé [Aiken, 2000a]. Premièrement, les MJSC sont conçus pour absorber la lumière sur une très large bande spectrale (soit environ 300 – 1800 nm). De plus, étant donné que les sous-cellules des MJSC sont typiquement connectées en série, le courant total est limité par la sous-cellule avec la plus petite capacité de production de courant. Ces deux particularités font que le design des ARC pour les MJSC doit tenir en considération la performance antiréfléchissante sur une très

large bande spectrale ainsi que la position des pertes par réflexion pour s'assurer de ne pas limiter le courant total. En d'autres termes, l'ARC doit être optimisé pour minimiser la réflexion dans la plage d'absorption de la ou des sous-cellule(s) limitante(s).

Premièrement, lorsque toutes les sous-cellules sont bien ajustées (c'est-à-dire qu'elles ont toutes le potentiel de produire le même courant) le design de l'ARC devient plus problématique et des techniques spéciales peuvent être envisagées : ARC triple ou quadruple couche, nano-texturisation de la surface. C'est le cas des 3JSC en désaccord de maille et des 4JSC. Les gaps de ces cellules solaires à haute efficacité sont ajustés de manière à ce que le spectre solaire soit absorbé également par chaque sous-cellule. Donc, même si le spectre de réflectance de l'ARC a un minimum à presque 0% sur une certaine plage de longueurs d'onde, la perte de courant occasionnée par une réflectance aussi petite que 5% sur une autre plage de longueurs d'onde limitera le courant total du dispositif. Ceci aurait environ le même effet qu'avoir une perte de 5% sur tout le spectre. Il est donc très important d'augmenter l'efficacité spectrale des ARC pour les MJSC à «courant également distribué» (*current matched*). Une approche proposée est d'utiliser la technique de l'équivalent Herpin pour imiter une 3L-ARC avec seulement deux matériaux différents [Aiken, 2000b].

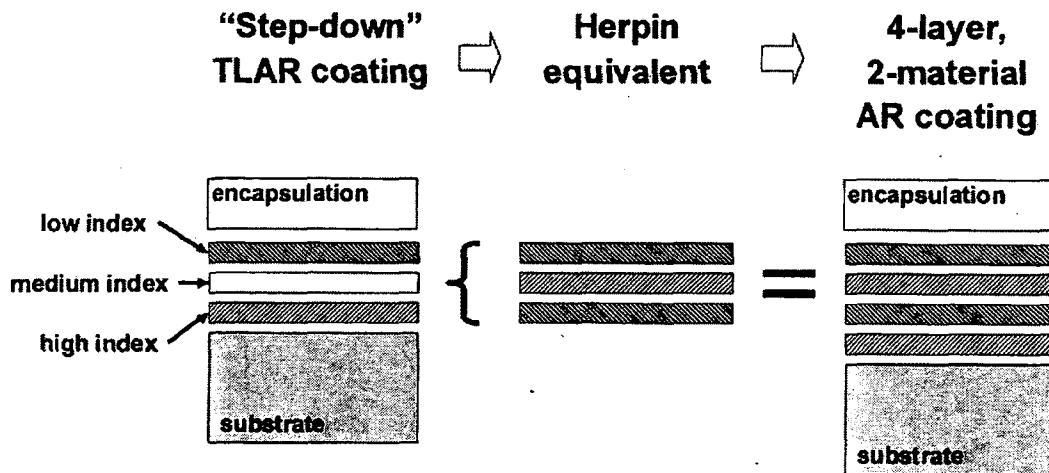


Figure 2.11 Schéma de l'approche de l'équivalent Herpin pour imiter une ARC triple couche avec seulement deux matériaux différents [Aiken, 2000b].

La figure 2.11 montre la technique de l'équivalent Herpin qui consiste à utiliser une couche mince d'indice élevé entre deux couches d'indice bas pour imiter une couche d'indice intermédiaire. Ainsi, avec 4 couches de seulement deux matériaux ($\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) la structure a des caractéristiques antiréfléchissantes d'une 3L-ARC. Une amélioration de

2,5% absolu a été obtenu pour la réflectance moyenne d'une 3L-ARC par équivalent Herpin par rapport à la 2L-ARC $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Deuxièmement, un groupe a récemment étudié une technique de texturisation de la couche fenêtre en AlInP des MJSC en semiconducteurs III-V [Tommila *et al.*, 2010]. La figure 2.13 montre 3 échantillons dont la surface en AlInP a été texturisée par nanolithographie par impression (*nanoimprint lithography*). Cet ARC a une excellente performance sur une grande largeur spectrale avec une réflectance moyenne de 2.7% sur 450 – 1650 nm. Par contre, le procédé de fabrication est plus complexe que la déposition d'une ou deux couches diélectriques par PECVD par exemple, et la durabilité à long terme d'une telle structure reste à vérifier. Peut être qu'il faudrait déposer une couche diélectrique par dessus les motifs en AlInP pour passiver et protéger la surface. Une étude serait à faire pour s'assurer que cette couche d'encapsulation en Si_xN_y ou SiO_2 par exemple ne dégrade pas la performance de l'ARC.

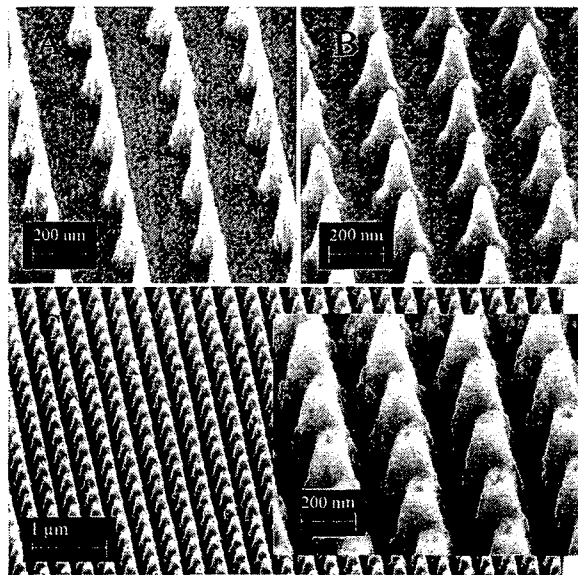


Figure 2.12 Motifs en *moth-eye* de différentes dimensions (trois échantillons différents : A, B et C) sur une couche en AlInP crue sur un substrat de GaAs [Tommila *et al.*, 2010].

Le principal défaut des 3JSC en III-V/Ge, qui est d'avoir un déséquilibre entre la production de courant de la sous-cellule en Ge et la production de courant des deux autres, simplifie le design de son ARC. En effet, le surplus de courant produit par la sous-cellule du dessous en Ge fait en sorte qu'une certaine perte de lumière par réflexion de 950 à 1800 nm environ n'affecte pas la performance de la cellule solaire. Un groupe a fait l'étude de différents ARC par empilement de couches minces diélectriques pour une 3JSC III-V/Ge limitée en courant par la sous-cellule du dessus [Valdivia *et al.*, 2008]. Dans cette étude,

la plage de longueur d'onde d'intérêt est donc réduite à 300 – 650 nm. Le maximum de réflectance est effectivement positionné à environ 500 nm et la réflectance moyenne est calculée sur la plage 300 – 650 nm. Optiquement, les meilleurs matériaux sont ceux qui n'ont pas d'absorption et qui ont des indices de réfraction appropriés pour faire le passage graduel entre le milieu d'incidence (ici l'air) et le substrat (ici l'AlInP). Les meilleurs 2L-ARC pour les 3JSC sont donc MgF_2/ZnS et $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ avec une réflectance moyenne de 1,6 et 1,7 %, respectivement.

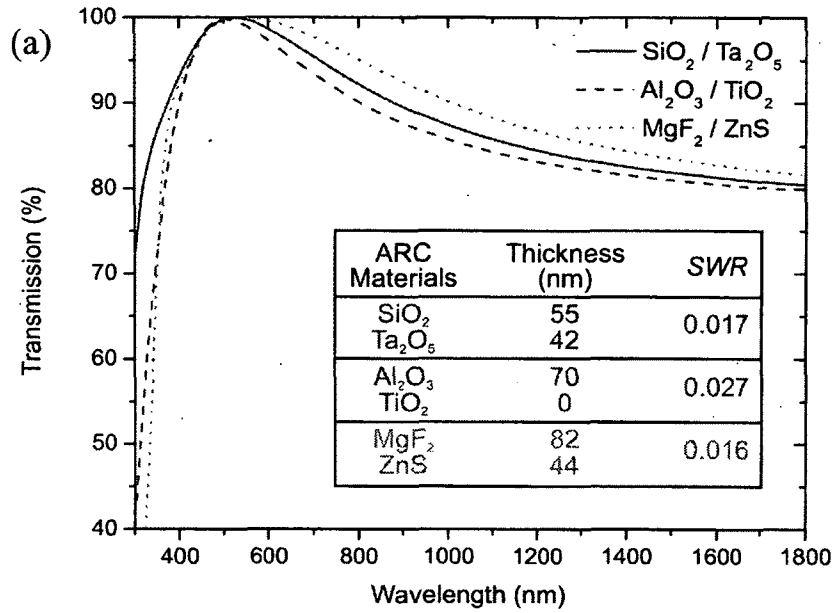


Figure 2.13 Spectres de transmittance de 2L-ARC pour comparer différents matériaux [Valdivia *et al.*, 2008].

CHAPITRE 3

Réflexion et transmission de la lumière

Une onde électromagnétique (la lumière) incidente à l'interface entre deux milieux avec des propriétés optiques différentes subit plusieurs phénomènes qui modifient sa propagation. Premièrement, à angle d'incidence non nul, la lumière change de direction de propagation par réfraction. De plus, une certaine portion de l'énergie lumineuse est réfléchiée et le reste est transmis selon les coefficients de transmission et réflexion de l'interface. Les sections suivantes expliquent les phénomènes de transmission et réflexion de la lumière incidente perpendiculairement à l'interface entre deux milieux d'indice différent, sur une couche transparente et finalement sur un empilement de couches transparentes.

3.1 Réflexion à une interface

Commençons par le cas le plus simple de la réflexion à une interface entre deux milieux d'indice différent. La figure 3.1 montre une onde électromagnétique incidente à une interface, ainsi que la portion réfléchiée et la portion transmise de cette onde. À l'aide des équations de Maxwell et des conditions de frontières, [Heavens, 1991] dérive les équations bien connues pour les coefficients de réflexion et de transmission de l'amplitude du champ électromagnétique à une interface :

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad (3.1)$$

$$t_1 = \frac{2n_0}{n_0 + n_1}. \quad (3.2)$$

Il est important de noter que ces équations ne sont valables qu'à incidence normale, c'est à dire si la lumière arrive perpendiculairement à l'interface. D'ailleurs, dans tout le développement qui suit pour la réflexion d'une multicouche, on considère le cas simplifié de l'incidence normale. Il est ainsi possible de relier E_R et E_T à E_I :

$$E_R = r E_I, \quad (3.3)$$

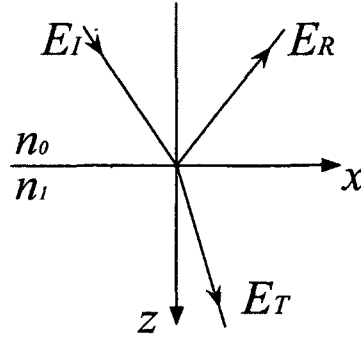


Figure 3.1 Champ électrique à une interface entre un milieu d'indice n_0 et un milieu d'indice n_1 . E_I , E_R et E_T sont respectivement l'amplitude des champs électriques incident, réfléchi et transmis.

$$E_T = tE_I. \quad (3.4)$$

Pour évaluer la réflexion et la transmission à une interface de manière plus pratique, la puissance lumineuse est considérée au lieu de l'amplitude des champs électriques, E , et magnétiques, H . La norme du vecteur de Poynting donne l'énergie lumineuse par unité de temps et de surface en fonction de l'amplitude du champ électrique :

$$\|\vec{S}\| = \frac{c}{4\pi} \|n\| \|E\|^2. \quad (3.5)$$

où c est la vitesse de la lumière et n est l'indice de réfraction complexe du milieu d'intérêt. Selon la figure 3.1 et les équations 3.3 à 3.5, les coefficients de réflexion et transmission de l'énergie lumineuse sont :

$$R = rr^*, \quad (3.6)$$

$$T = \frac{\|n_1\|}{\|n_0\|} tt^*, \quad (3.7)$$

où r^* et t^* sont les complexes conjugués de r et t respectivement, car les indices de réfraction peuvent être complexes. La partie imaginaire d'un indice de réfraction représente le coefficient d'extinction et est proportionnelle au coefficient d'absorption.

3.2 Couche transparente sur un substrat

En utilisant les coefficients de réflexion et de transmission de l'amplitude du champ électromagnétique à une interface (équations 3.1 et 3.2), il est possible de déduire les coefficients de réflexion et de transmission pour une couche, c'est-à-dire deux interfaces. Le dévelop-

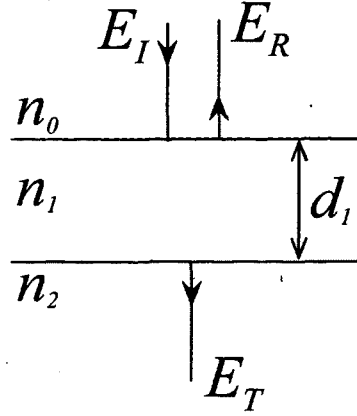


Figure 3.2 Champ électrique incident, réfléchi et transmis par une couche d'indice n_1 et d'épaisseur d_1 sur un substrat d'indice n_2 .

pement tient en considération la somme infinie des réflexions multiples et les phénomènes d'interférences [Heavens, 1991]. Ainsi, avec le changement de phase dans la couche 1,

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1, \quad (3.8)$$

les coefficients de réflexion et transmission de l'amplitude du champ électromagnétique pour une couche sont :

$$r_{eff1} = \frac{r_1 + r_2 e^{-2i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta_1}}, \quad (3.9)$$

$$t_{eff1} = \frac{t_1 t_2 e^{-i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta_1}}. \quad (3.10)$$

La dépendance de r_{eff1} et t_{eff1} face à la longueur d'onde de la lumière incidente provient du terme δ_1 , mais les indices de réfraction des matériaux dépendent également de λ . L'épaisseur de la couche n'est présente que dans le terme δ_1 .

De façon similaire à la démarche décrite dans la section 3.1, l'énergie lumineuse réfléchie et transmise par une couche est donnée par les coefficients suivant :

$$R = r_{eff1} r_{eff1}^*, \quad (3.11)$$

$$T = \frac{\|n_2\|}{\|n_0\|} t_{eff1} t_{eff1}^*. \quad (3.12)$$

3.3 Structure multicouche

La méthode de Rouard [Heavens, 1991] à incidence normale est utilisée pour calculer exactement les coefficients de transmission et réflexion (R et T) d'un empilement de couches minces. Tout d'abord, le développement des deux dernières sections est refait brièvement pour un cas général d'une couche quelconque. La figure 3.3 montre un empilement de j couches d'indice complexe de la forme $\mathbf{n}(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda)$. Les équations 3.13 et 3.14

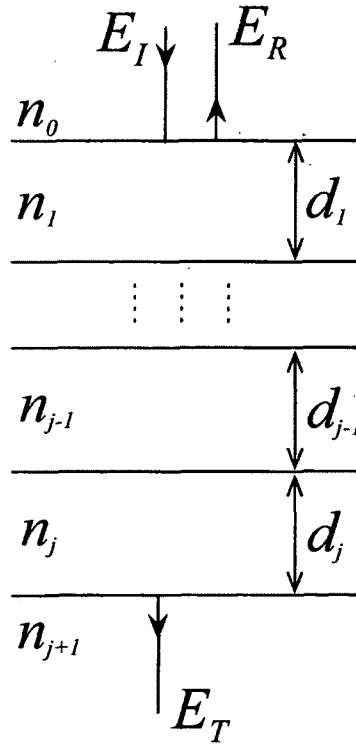


Figure 3.3 Champs électriques incident, réfléchi et transmis par une structure de j couches entre un milieu d'incidence d'indice n_0 et un substrat d'indice n_{j+1}

sont respectivement le coefficient de réflexion et de transmission de l'amplitude d'une onde électromagnétique à l'interface j entre deux matériaux d'indice \mathbf{n}_{j-1} et \mathbf{n}_j :

$$r_j = \frac{\mathbf{n}_{j-1} - \mathbf{n}_j}{\mathbf{n}_{j-1} + \mathbf{n}_j}, \quad (3.13)$$

$$t_j = \frac{2\mathbf{n}_{j-1}}{\mathbf{n}_{j-1} + \mathbf{n}_j}. \quad (3.14)$$

L'équation 5.5 est l'épaisseur optique d'une couche d'épaisseur d_j et d'indice de réfraction n_j à la longueur d'onde λ :

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j. \quad (3.15)$$

Si on considère la couche du bas, c'est-à-dire la couche j , prise entre un milieu d'incidence d'indice n_{j-1} et un milieu de transmission d'indice n_{j+1} , la somme infinie des réflexions et transmissions multiples donne les équations suivantes pour les coefficients de réflexion et de transmission d'une couche j :

$$r_{effj} = \frac{r_j + r_{j+1}e^{-2i\delta_j}}{1 + r_j r_{j+1}e^{-2i\delta_j}}, \quad (3.16)$$

$$t_{effj} = \frac{t_j t_{j+1}e^{-i\delta_j}}{1 + r_j r_{j+1}e^{-2i\delta_j}}. \quad (3.17)$$

Ensuite, la méthode de Rouard pour les multicouches transparentes fonctionne par itération des équations 3.16 et 3.17 en partant de la couche du bas et en remontant jusqu'à la surface couche par couche. Par exemple, la lumière incidente sur la couche $j - 1$ voit les coefficients suivants qui tiennent comptent des couches j et $j - 1$:

$$r_{effj-1} = \frac{r_{j-1} + r_{effj}e^{-2i\delta_{j-1}}}{1 + r_{j-1}r_{effj}e^{-2i\delta_{j-1}}}, \quad (3.18)$$

$$t_{effj-1} = \frac{t_{j-1}t_{effj}e^{-i\delta_{j-1}}}{1 + r_{j-1}r_{effj}e^{-2i\delta_{j-1}}}. \quad (3.19)$$

Par cette méthode on obtient finalement les équations suivantes pour les coefficients de réflexion et de transmission de l'amplitude électromagnétique sur une multicouche :

$$r_{eff1}(\mathbf{n}_0, \dots, \mathbf{n}_{j+1}, d_1, \dots, d_j, \lambda) = \frac{r_1 + r_{eff2}e^{-2i\delta_1}}{1 + r_1 r_{eff2}e^{-2i\delta_1}}, \quad (3.20)$$

$$t_{eff1}(\mathbf{n}_0, \dots, \mathbf{n}_{j+1}, d_1, \dots, d_j, \lambda) = \frac{t_1 t_{eff2}e^{-i\delta_1}}{1 + r_1 r_{eff2}e^{-2i\delta_1}}. \quad (3.21)$$

Plus j est grand plus r_{eff1} est complexe, mais en général 3 ou 4 couches sont suffisantes pour faire un très bon revêtement antireflet. Finalement, les coefficients de transmission et de réflexion d'une multicouche pour l'énergie lumineuse sont :

$$R = r_{eff1} r_{eff1}^*, \quad (3.22)$$

$$T = \frac{\|\mathbf{n}_{j+1}\|}{\|\mathbf{n}_0\|} t_{eff1} t_{eff1}^*. \quad (3.23)$$

R et T sont des nombres réels de 0 à 1. Pour une structure sans aucune absorption, $R + T = 1$. S'il y a de l'absorption dans une ou plusieurs couches alors, $R + T = 1 - A$ ou simplement $R + T + A = 1$. Ainsi on évalue l'absorption, car on peut calculer R et T indépendamment.

CHAPITRE 4

Simulation des revêtements antireflet pour cellules solaires

La simulation des performances de l'ARC a pour objectif de maximiser la lumière transmise à la région active de la cellule solaire, ce qui en retour maximise le courant produit par la cellule. Les sections qui suivent décrivent en détails le processus d'optimisation des ARC pour les cellules solaires. Tout d'abord, le spectre solaire permet de savoir la distribution en longueur d'onde de l'énergie disponible. Ensuite, l'ARC est caractérisé par son spectre de transmittance $T(\lambda)$ ou son spectre de réflectance $R(\lambda)$ qui est suffisant dans le cas où les matériaux de l'ARC n'ont pas d'absorption. $T(\lambda)$ et $R(\lambda)$ dépendent du nombre de couches, de leurs propriétés optiques et de leur épaisseur. Enfin, l'efficacité quantique d'une cellule solaire permet de calculer J_{sc} en fonction des paramètres de l'ARC.

4.1 Spectre solaire

La figure 4.1 montre les spectres solaires, mesurés à la surface de la terre (AM1.5) ou dans l'espace (AM0). Le spectre solaire global contient la lumière directe du soleil et la lumière diffusée par l'atmosphère. Étant donnée le très petit angle d'acceptance (normalement $<1^\circ$) des concentrateurs optiques, seulement la lumière directe du soleil est utile en CPV. Le spectre solaire a des unités d'énergie par unité de temps, de surface et de longueur d'onde ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{nm}^{-1}$). En PV, c'est le flux de photons (figure 4.2) qui est plus utile pour calculer le courant disponible pour la cellule. On le calcule en divisant le spectre solaire par l'énergie d'un photon en fonction de la longueur d'onde. Lorsqu'on tente de distribuer le courant également entre chaque sous-cellule d'une MJSC, c'est l'aire sous la courbe du flux de photons en fonction de la longueur d'onde qu'il faut séparer en parties égales.

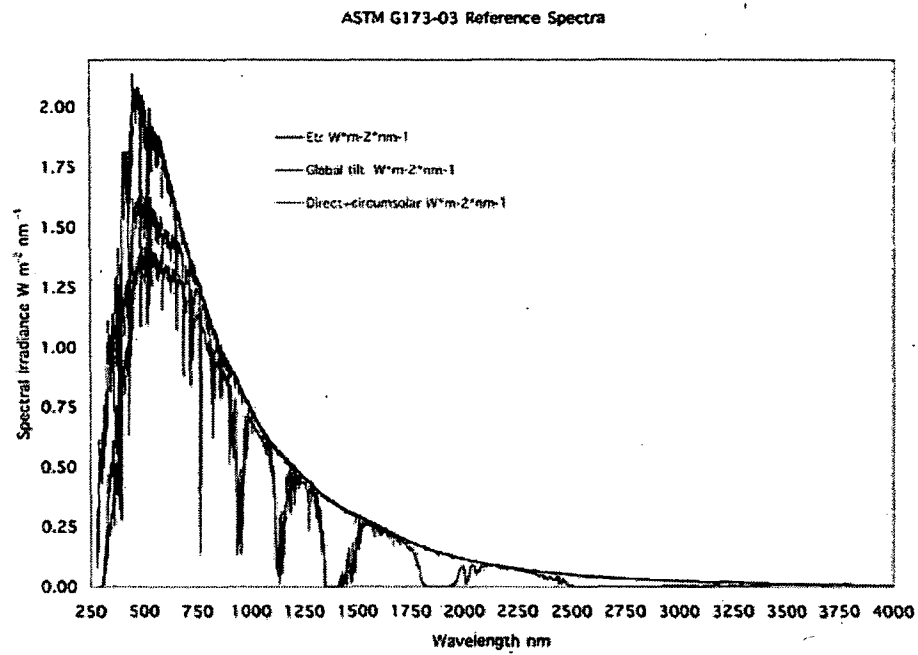


Figure 4.1 Spectres solaires AM1.5 direct, AM1.5 global et AM0 [NREL, 2012].

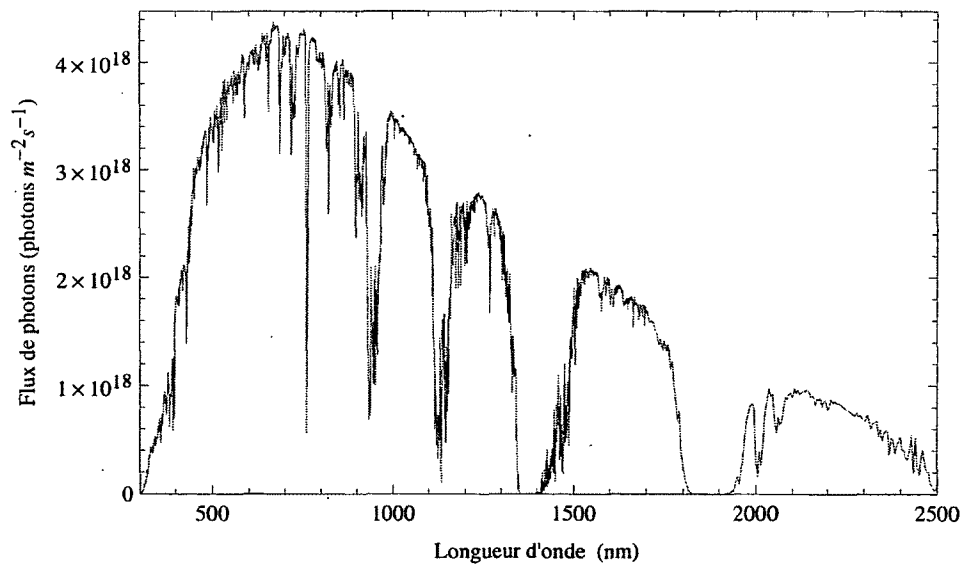


Figure 4.2 Spectre solaire AM1.5 direct en unités de flux de photons.

4.2 Propriétés optiques des matériaux

Les matériaux transparents de l'ARC, tout comme les semiconducteurs qui composent la cellule solaire sont caractérisés par leurs propriétés optiques, soient l'indice de réfraction et le coefficient d'extinction. Le coefficient d'extinction k est la partie imaginaire de l'indice de réfraction complexe \mathbf{n} selon l'équation suivante :

$$\mathbf{n}(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda). \quad (4.1)$$

Les semiconducteurs ont la particularité d'avoir un coefficient d'extinction élevé à partir de leur seuil d'absorption en longueur d'onde. Ainsi, ils absorbent les photons d'énergie égale ou supérieure à leur gap. Les matériaux transparents ont quand à eux un coefficient d'absorption idéalement le plus faible possible pour toutes les longueurs d'onde.

Pour optimiser un ARC, il est nécessaire d'avoir des matériaux transparents avec des indices de réfractions appropriés. En effet, le but de l'ARC est de créer un gradient d'indice de réfraction en partant du milieu d'incidence ($n \approx 1$ ou 1,5 selon le cas) jusqu'aux semiconducteurs de la cellule solaire ($n > 3$). Le principal défi est d'obtenir des matériaux transparents à faible indice ($< 1,4$) et à haut indice ($> 2,3$) tout en limitant l'absorption dans l'UV.

Les propriétés optiques des semiconducteurs des cellules solaires sont prises dans la littérature tandis que celles des matériaux transparents déposés par PECVD sont mesurées par ellipsométrie. L'ellipsomètre à notre disposition permet de mesurer n et k de 380 à 890 nm. En utilisant le modèle de Cauchy, n et k sont extrapolés jusqu'à 300 et 1800 nm (figures 4.3 et 4.4).

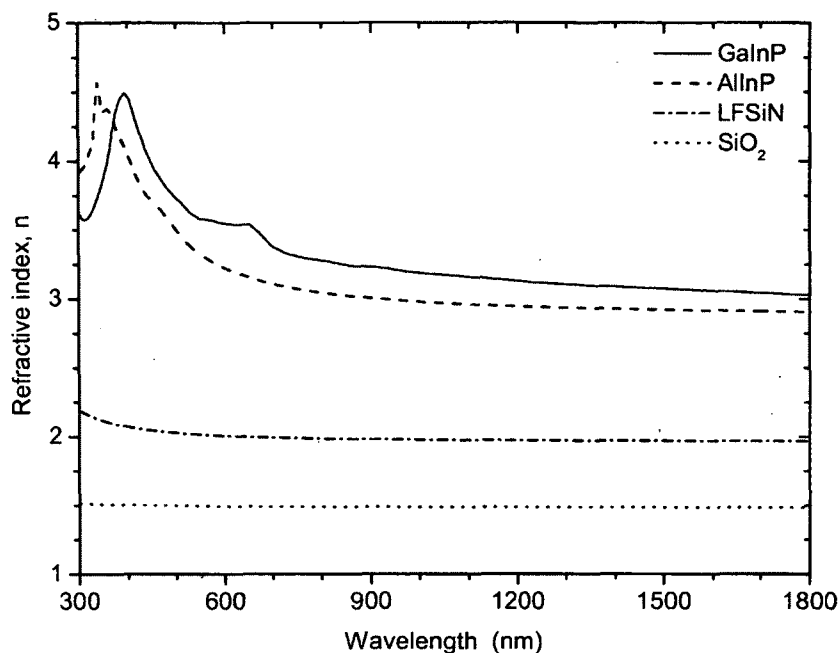


Figure 4.3 Indice de réfraction du LFSiN et du SiO₂ mesuré par ellipsométrie et extrapolé suivant le modèle de Cauchy ainsi que l'indice de réfraction d'autres matériaux utilisés dans ce travail (pour plus de détails voir la même figure dans le chapitre 5).

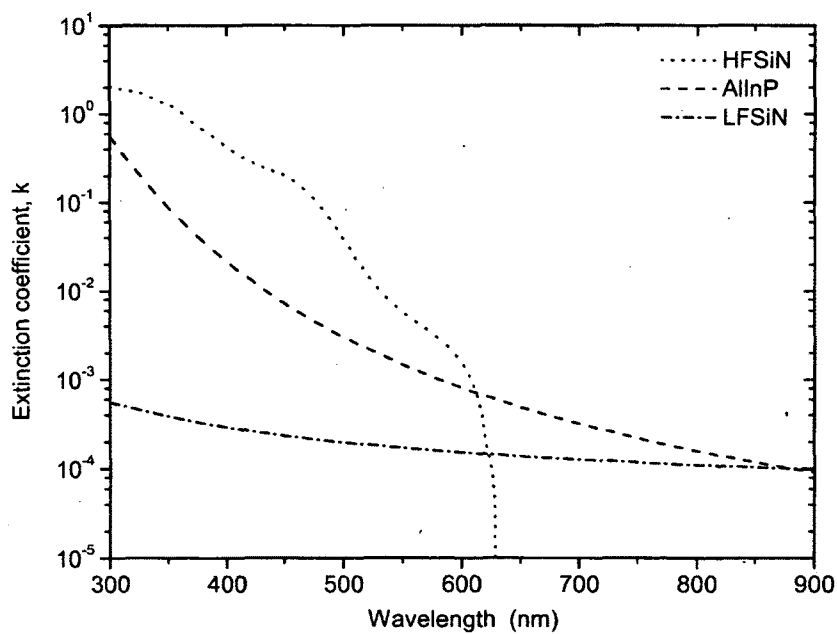


Figure 4.4 Coefficient d'extinction du LFSiN, du HFSiN et de l'AlInP (pour plus de détails voir la même figure dans le chapitre 5).

4.3 Calcul de $T(\lambda)$ et $R(\lambda)$

La théorie pour calculer les coefficients d'absorption d'une structure multicouche en utilisant la méthode de Rouard est donnée dans le chapitre 3. En suivant l'algorithme représenté par la figure 4.5, le coefficient de réflexion d'une structure multicouche est calculée en fonction du nombre de couches, de l'épaisseur de chaque couche, des propriétés optiques de chaque couche et de la longueur d'onde. Pour calculer le coefficient de transmission, l'Éq. 3.16 est remplacée par l'Éq. 3.17 et l'Éq. 3.18 par l'Éq. 3.19. De plus, il faut s'assurer de respecter la conservation de l'énergie dans le cas du coefficient de transmission (voir l'équation 3.23) selon la relation de Poynting. Il existe plusieurs logiciels commerciaux pour calculer

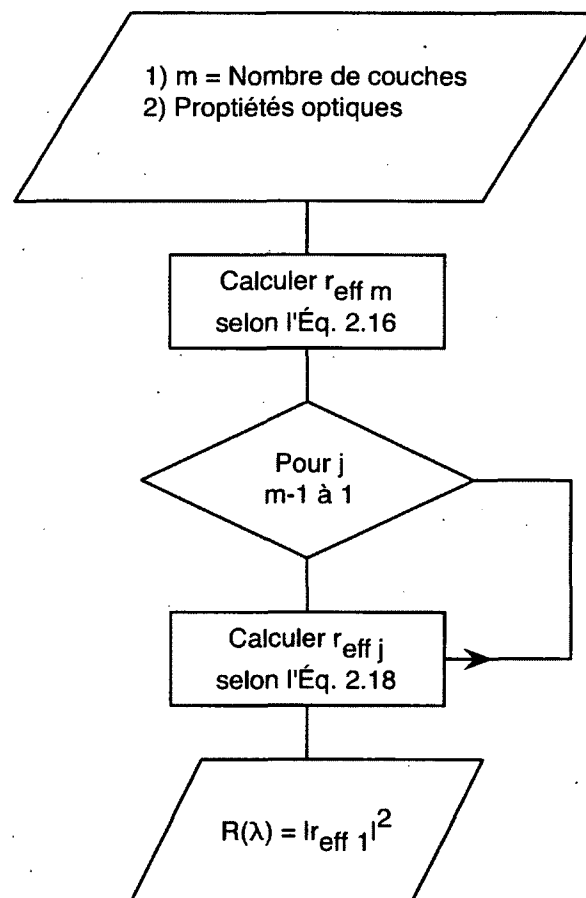


Figure 4.5 Algorithme pour calculer la réflectance d'une structure de m couches selon la méthode de Rouard.

la transmittance, la réflectance et l'absorption des structures en multicouche, mais l'utilisation de cet algorithme permet de contrôler plus facilement les multiples paramètres : épaisseurs, propriétés optiques, nombre de couches, etc.

4.4 Efficacité quantique et courant de court circuit

Pour optimiser un ARC, le simple calcul de la transmittance et de la réflectance ne suffit pas. En effet, étant donné qu'il est impossible d'avoir une réflectance nulle sur toutes les longueurs d'onde en même temps, il faut déterminer les longueurs d'onde vis-à-vis desquelles les pertes par réflexions auront le moins d'impact sur la performance de la cellule solaire. Ceci est fait d'une part en utilisant le spectre solaire qui donne l'énergie disponible pour chaque longueur d'onde et d'autre part en utilisant l'efficacité quantique de la cellule qui donne la fraction des photons incidents convertis en courant en fonction de la longueur d'onde. Cette fraction représente l'efficacité quantique externe (EQE) de la cellule. L'efficacité quantique interne (IQE) peut ensuite être calculée ou estimée en utilisant la relation suivante :

$$EQE(\lambda) = T(\lambda) \times IQE(\lambda), \quad (4.2)$$

où $T(\lambda)$ est le coefficient de transmission du revêtement antireflet.

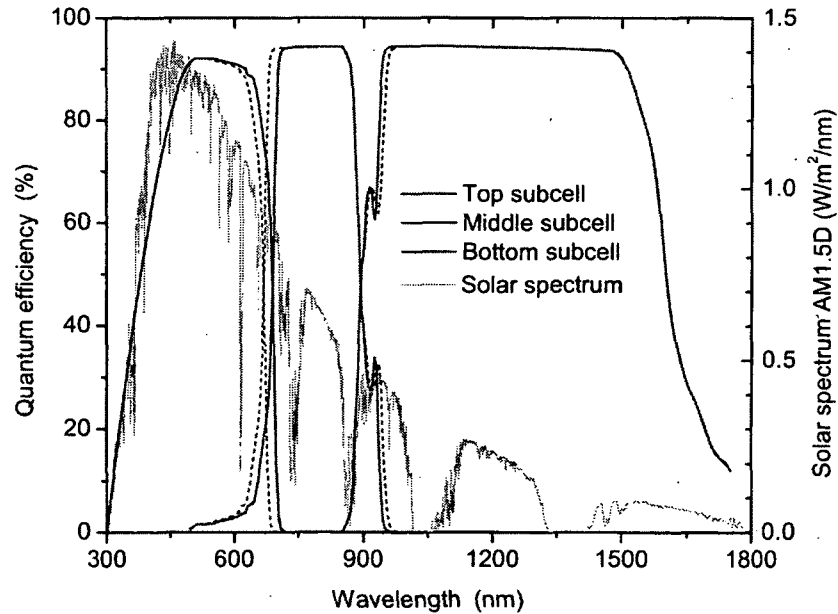


Figure 4.6 Efficacité quantique interne de deux designs de 3JSC GaInP/InGaAs/Ge fournis par Cyrium Technologies Inc. comparée au spectre solaire AM1.5D. Lignes pleines : 3JSC limité par la sous-cellule du milieu. Lignes en tirets : 3JSC limité par la sous-cellule du haut.

L'optimisation de l'ARC consiste alors à maximiser la densité de courant de court-circuit de la cellule solaire selon l'équation suivante :

$$J_{SC} = q \int \frac{I(\lambda)}{E(\lambda)} T(\lambda, d_1, \dots, d_m, \mathbf{n}_0, \dots, \mathbf{n}_{m+1}) IQE(\lambda) d\lambda, \quad (4.3)$$

où q représente la charge électrique élémentaire, $I(\lambda)$ l'irradiance du soleil, $E(\lambda)$ l'énergie d'un photon et $T(\lambda, d_1, \dots, d_m, \mathbf{n}_0, \dots, \mathbf{n}_{m+1})$ est la transmittance de l'ARC en fonction de la longueur d'onde, de l'épaisseur de chaque couche et des propriétés optiques de chaque matériau. Pour une MJSC, J_{SC} doit être calculée pour chaque sous-cellule séparément et l'optimisation de l'ARC consiste à maximiser le courant de celle qui en produit le moins.

4.5 Algorithme d'optimisation

En principe l'optimisation de l'ARC consiste simplement à maximiser J_{SC} en faisant varier le nombre de couches transparentes ainsi que leurs paramètres (épaisseur et propriétés optiques). En pratique, certaines variables sont fixées suivant certaines hypothèses pour rendre les calculs plus raisonnables.

Par exemple, le nombre de couches de l'ARC et leurs propriétés optiques sont déterminés par l'équation 4.4 [Valdivia *et al.*, 2008] ainsi que la disponibilité de matériaux réels.

$$n_m = n_{sup}^{\left(\frac{M+1-m}{M+1}\right)} n_{sub}^{\left(\frac{m}{M+1}\right)}, \quad (4.4)$$

où n_m est l'indice de réfraction de la couche m de l'ARC, M est le nombre de couches de l'ARC et n_{sup} et n_{sub} sont les indices de réfraction du superstrat et du substrat, respectivement. Par exemple, un ARC double couche ($M = 2$) sur un substrat d'AlInP ($n = 3,15$ à la longueur d'onde de 650 nm) et avec superstrat l'air ($n \approx 1$), l'indice optimal pour chaque couche est : $n_1 = 3,15^{1/3} = 1,466$ et $n_2 = 3,15^{2/3} = 2,149$. Ces indices correspondent à de nombreux matériaux réels tels que le SiO_2 et le Ta_2O_5 par exemple. Comme le but ultime de l'ARC est d'éliminer le saut d'indice de réfraction entre le superstrat et le substrat, une infinité de couches qui donnerait un gradient d'indice de n_{sup} à n_{sub} serait théoriquement optimal. Cela implique que tant que les matériaux d'indice approprié sont disponibles, plus le nombre de couche est élevé, plus l'ARC peut être performant. Cependant, dès que le 3L-ARC est considéré, les indices extrêmes sont plus difficiles à trouver ($n \approx 1,33$ et $n \approx 2,36$).

Ensuite, l'épaisseur optimale pour chaque couche est déterminée en calculant $J_{SC}(d_1, d_2)$ dans le cas d'un ARC double couche. Comme point de départ pour les épaisseurs, on peut considérer un ARC quart d'onde à la longueur d'onde où le minimum de réflexion devrait approximativement se trouver. C'est-à-dire que la lumière qui parcourt un aller-retour dans l'ARC serait déphasée d'une demi-longueur d'onde par rapport à la lumière réfléchiée à la surface. Ainsi en prenant $\lambda = 700$ nm (i.e. environ la longueur d'onde du flux de photon maximum et la frontière entre les sous-cellules du dessus et du milieu) une épaisseur d'environ 50 nm pour chaque couche est calculée. Un mapping de $J_{SC}(d_1, d_2)$ pour d_1 et d_2 variant de 0 à 100 nm chacun par petit saut (1 ou 2 nm) permet de trouver l'épaisseur optimale pour chaque couche.

De plus, un facteur qui influence grandement le temps de calcul de J_{SC} est l'intégration sur toutes les longueurs d'onde du spectre solaire. L'*American Society for Testing and Materials* [NREL, 2012] donne le spectre solaire AM1.5D avec une précision de 0.5 nm de 280 à 400 nm et une précision de 1 nm de 400 à 1700 nm et il est très irrégulier. Ainsi, il est difficile d'interpoler les données pour faire une intégration standard. La méthode utilisée pour calculer l'intégrale de l'équation 4.3 consiste à sommer les quantités suivant les points du spectre solaire. L'exemple suivant illustre ce calcul en supposant une plage de longueurs d'onde de λ_{min} à λ_{max} et 3 points du spectre solaire dans cette plage. La figure 4.7 montre une certaine portion fictive du spectre solaire. Les lignes sont des interpolations linéaires entre les points du spectre.

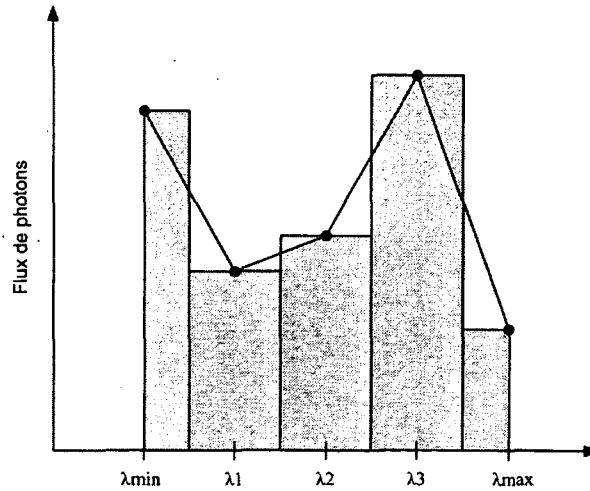


Figure 4.7 Quelques points fictifs du spectre solaire pour illustrer la méthode de sommation pour calculer l'intégrale dans l'équation de J_{SC} .

L'*IQE* ainsi que T varient très lentement avec la longueur d'onde comparativement au spectre solaire, donc il n'est pas nécessaire d'inclure des points intermédiaires entre λ_1 ,

λ_2 et λ_3 . $IQE(\lambda)$ est interpolé pour avoir une valeur à chaque point du spectre solaire et $T(\lambda)$ est calculé seulement pour ces points. L'intégrale pour évaluer J_{SC} doit être calculée pour chaque points d'épaisseur (d_1, d_2) pour faire le mapping.

Finalement, pour réduire davantage le temps du calcul, il est possible de prendre seulement un point du spectre solaire tous les x points. Comme le spectre solaire est très irrégulier, J_{SC} est affecté par cette astuce. Cependant, la réflectance (ou transmittance) moyenne pondérée R_W (ou T_W), quantité utilisée pour caractériser la performance d'un ARC, n'est pour sa part presque pas affectée même en prenant seulement un point du spectre solaire sur 10. Ceci est expliqué par le fait que le calcul de R_W et T_W inclue le rapport de l'intégrale du spectre solaire, ce qui tend à réduire les différences. De plus, ceci est possible seulement parce que $IQE(\lambda)$, $T(\lambda)$ et $R(\lambda)$ varient très lentement comparativement au spectre solaire.

CHAPITRE 5

Revêtement antireflet LFSiN/SiO₂ pour cellules solaires triple-jonction III-V/Ge

Avant-propos

Auteurs et affiliation :

Ram Homier : Étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie électrique et de génie informatique.

Abdelatif Jaouad : Professeur associé, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie électrique et de génie informatique.

Artur Turala : Post-doctorant, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie-électrique et de génie informatique.

Cristopher E. Valdivia : Cyrium Technologies Inc., Ottawa, ON, Canada

Denis Masson : Cyrium Technologies Inc., Ottawa, ON, Canada

Steven G. Wallace : Cyrium Technologies Inc., Ottawa, ON, Canada

Simon Fafard : Cyrium Technologies Inc., Ottawa, ON, Canada

Richard Arès : Professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.

Vincent Aimez : Professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie électrique et de génie informatique.

Date de publication : juillet 2012

Revue : IEEE Journal of Photovoltaics

Titre français : Design de revêtements antireflet pour cellules solaires triple-jonction à haute efficacité à base de semiconducteurs III-V et Ge par nitrure de silicium PECVD à faible absorption.

Contribution au document : Cet article décrit en détails la méthode utilisée dans ce travail de maîtrise pour optimiser les ARC pour cellules solaires multi-jonction. De plus les principaux résultats concernant les calculs de la performance de l'ARC double couche SiO₂/LFSiN PECVD y sont donnés.

Résumé français : Le design d'un revêtement antireflet (ARC) pour cellules solaires multi-jonction présente des défis à cause de la large bande d'absorption et du besoin d'égaliser le courant produit par chaque sous-cellule. Le nitrure de silicium déposé par PECVD en utilisant des conditions standards est largement utilisé dans l'industrie des cellules solaires à base de silicium. Cependant, ce diélectrique présente de l'absorption dans la plage des courtes longueurs d'onde. Nous proposons l'utilisation du nitrure de silicium déposé par PECVD basse fréquence (LFSiN) optimisé pour avoir un haut indice de réfraction et une faible absorption optique pour l'ARC pour cellules solaires triple-jonction III-V/Ge. Ce matériau peut aussi servir de couche de passivation/encapsulation. Les simulations montrent que l'ARC double couche SiO₂/LFSiN peut être très efficace pour réduire les pertes par réflexion dans la plage de longueurs d'onde de la sous-cellule limitante autant pour des cellules solaires triple-jonction limitées par la sous-cellule du haut que pour celles limitées par la sous-cellule du milieu. Nous démontrons aussi que la performance de la structure est robuste par rapport aux fluctuations des paramètres des couches PECVD (épaisseurs, indice de réfraction).

Antireflection coating design for triple-junction III-V/Ge high efficiency solar cells using low absorption PECVD silicon nitride

Ram Homier¹, Abdelatif Jaouad¹, Artur Turala¹, Christopher E. Valdivia², Denis Masson², Steven G. Wallace², Simon Fafard², Richard Arès¹ and Vincent Aimez¹

¹ Centre de recherche en nanofabrication et nanocaractérisation (CRN²), Department of Electrical and Computer Engineering, University of Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada
e-mail : Abdelatif.Jaouad@USherbrooke.ca

² Cyrium Technologies Inc., Ottawa, ON, Canada

Abstract—The design of antireflection coating (ARC) for multi-junction solar cells is challenging due to the broadband absorption and the need for current-matching of each subcell. Silicon nitride deposited by PECVD using standard conditions is widely used in the silicon wafer solar cell industry, but typically suffers from absorption in the short-wavelength range. We propose the use of silicon nitride deposited by low frequency PECVD (LF-SiN) optimized for high refractive index and low optical absorption as a part of the ARC design for III-V/Ge triple-junction solar cells. This material can also act as a passivation/encapsulation coating. Simulations show that the SiO₂/LFSiN double layer ARC can be very effective for reducing the reflection losses over the wavelength range of the limiting subcell for top subcell-limited as well as middle subcell-limited triple-junction solar cells. We demonstrate also that the structure's performance is stable over expected variations in the layer parameters (thickness and refractive index) in the vicinity of the optimal values.

5.1 Introduction

Multi-junction solar cells (MJSC), which hold the world records of conversion efficiency, are mainly used in space applications and terrestrial concentrated photovoltaic (CPV) systems. The complexity of their design results in high fabrication costs, which is rationalized by their high conversion efficiencies (more than 40% under optical concentration). As for single junction solar cells, MJSCs require an optimized antireflection coating (ARC) to prevent large losses of incident light due to surface reflection (more than 25%).

Extensive studies have been done on solar cell ARCs, but few particularly for MJSCs. As explained by Aiken [Aiken, 2000a], ARC designs for MJSCs can be more challenging than for single junction devices. Indeed, since the subcells in MJSCs are typically series-connected, the total current generated by the whole cell is limited by the subcell that has the lowest current-generating capability. Therefore, the ARC must be designed to minimize the light losses in the absorption range of the limiting subcell in order to achieve higher total currents. Moreover, a very wide spectral effectiveness of the ARC is required, because MJSCs absorb light in a broad spectral range (300 – 1800 nm).

This broadband effectiveness can be achieved by using a subwavelength surface structuring, as proposed by Tommila [Tommila *et al.*, 2010]. An averaged reflectivity of only 2.7% over a wide spectral range of 450 – 1650 nm was observed. A different approach is a multilayer ARC consisting of different transparent materials. Aiken [Aiken, 2000b] proposed to use the Herpin equivalent technique to emulate a triple-layer ARC using only two different materials : TiO₂ and Al₂O₃. However, because the III-V/Ge triple-junction solar cells (3JSC) are normally current-limited by either the top or the middle subcell, the spectral range required for their ARC is reduced to 300 – 950 nm for these widely used MJSCs. In fact, the bottom Ge junction delivers current in excess, therefore a loss of illumination at longer wavelengths is not as critical. Valdivia [Valdivia *et al.*, 2008] has simulated the performance of various ARC designs for a 3JSC that is current-limited by the top subcell. The paper showed that the solar weighted reflectance of the best double layer ARCs (MgF₂/ZnS, SiO₂/Ta₂O₅) is ~1.6 – 1.7% over the range of the top subcell (i.e. about 300 – 650 nm).

Many considerations must be accounted for when choosing the ARC materials, including their optical and mechanical properties, as well as their applicable deposition techniques. Silicon nitride (Si_xN_y) is widely used in passivation layers and antireflection coatings for silicon wafer solar cells. This material, known for its hardness and its potential to protect the surface against the environmental influence (oxygen, humidity), can be deposited

at relatively low temperature by plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD). However, this material has not been studied for single or double layer ARC designs (e.g., in combination with SiO₂) for MJSCs using a simple thin film deposition process. This is likely due to its absorption in the UV/VIS range, which is particularly undesired for MJSCs.

Recently, a technique for obtaining very low absorption Si_xN_y films has been developed [Gorin *et al.*, 2008]. This PECVD process uses a low frequency, i.e. below 1 MHz (LF-PECVD) and exploits the continuous bombardment of the surface by protons that are able to cross over the sheath region. This bombardment densifies the film by removing the hydrogen [Chang *et al.*, 1988] and reduces the silicon nanocrystal incorporation which is believed to be a main source of absorption in the UV/VIS range [Karunagaran *et al.*, 2007].

In this work the high potential of LF-PECVD silicon nitride (LFSiN) for MJSCs' ARC is demonstrated by simulation. The method allows the optimization of thin film multi-layer ARCs to minimize the reflection losses over the wavelength range of the limiting subcell(s) under any specific solar spectrum. The SiO₂/LFSiN structure is optimized to provide a very good ARC for both top subcell-limited (TL) and middle subcell-limited (ML) types of 3JSCs. Since LFSiN can ensure good surface passivation of III-V materials [Jaouad *et al.*, 2004],[Jaouad et Aimez, 2006], the SiO₂/LFSiN structure studied in this work can act as a multipurpose antireflection/encapsulation/passivation coating.

5.2 ARC optimization

A typical structure of a III-V/Ge 3JSC used in this study is shown in Figure 5.1 . It is clear that a rigorous simulation should consider all dielectric and III-V layers as part of the multi-layer structure and Ge as the substrate. In this article, a simplification of this structure model was used : Air – ARC layers – AlInP – GaInP. This model considers the AlInP window layer as a part of the thin film multi-layer structure and the GaInP top subcell as the substrate.

The goal of an ARC design for a solar cell is to maximize the short-circuit current density J_{sc} of the device, which is calculated by Eq. 5.1 [Aiken, 2000a]

$$J_{sc} = q \int \frac{I(\lambda)}{E(\lambda)} (1 - R(\lambda)) IQE(\lambda) d\lambda, \quad (5.1)$$

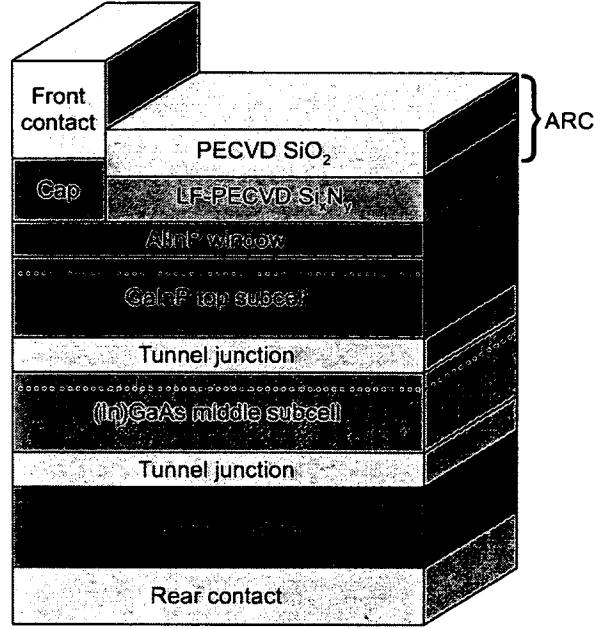


Figure 5.1 Typical structure of a 3JSC.

where q represents the elementary electric charge, $I(\lambda)$ the irradiance, $E(\lambda)$ the energy of a photon, $IQE(\lambda)$ the internal quantum efficiency of the cell and $R(\lambda)$ the reflection coefficient of the incident light energy (or reflectance). For MJSCs, this equation must be written for each subcell, and the ARC needs to be optimized so that the current produced by the limiting subcell is increased. Considering the global structure (air/ARC/cell) as a stack of thin transparent films with complex refractive index $\mathbf{n}_j(\lambda) = n_j(\lambda) - ik_j(\lambda)$ and thickness d_j between an incidence medium of index \mathbf{n}_0 and a substrate of index \mathbf{n}_{j+1} , $R(\lambda)$ can be calculated by Eq. 5.2 and Eq. 5.3 according to the Rouard method [Heavens, 1991] :

$$R(\mathbf{n}_0, \dots, \mathbf{n}_{j+1}, d_1, \dots, d_j, \lambda) = r_{eff1} r_{eff1}^*, \quad (5.2)$$

$$r_{eff1}(\mathbf{n}_0, \dots, \mathbf{n}_{j+1}, d_1, \dots, d_j, \lambda) = \frac{r_1 + r_{eff2} e^{-2i\delta_1}}{1 + r_1 r_{eff2} e^{-2i\delta_1}}, \quad (5.3)$$

where

$$r_j = \frac{\mathbf{n}_{j-1} - \mathbf{n}_j}{\mathbf{n}_{j-1} + \mathbf{n}_j} \quad (5.4)$$

is the reflection coefficient of an electromagnetic wave amplitude at the interface j between two media of index n_{j-1} and n_j . At wavelength λ , the optical thickness of the layer j with thickness d_j and index n_j is :

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j. \quad (5.5)$$

The effective reflection coefficient of a thin layer is the infinite summation of multiple reflections and transmissions with the interference phenomena in the layer and can be calculated by :

$$r_{effj} = \frac{r_j + r_{j+1}e^{-2i\delta_j}}{1 + r_j r_{j+1}e^{-2i\delta_j}}. \quad (5.6)$$

However, this equation is valid for the layer j only (i.e. the bottom layer of the ARC structure) but by using Eq. 5.7 for the effective reflection coefficient of the layer just above we can calculate r_{eff1} by starting from the bottom and progressing layer by layer towards the top :

$$r_{effj-1} = \frac{r_{j-1} + r_{effj}e^{-2i\delta_{j-1}}}{1 + r_{j-1}r_{effj}e^{-2i\delta_{j-1}}}. \quad (5.7)$$

Finally, r_{eff1} represents the reflection coefficient of the top layer considering the entire structure below, or in other words, the reflection coefficient of the multilayer ARC structure.

To calculate the reflectance spectrum of the ARC, the wavelength-dependent optical properties must be known for each layer. Figure 5.2 and 5.3, respectively, show the refractive indices (n) and the extinction coefficients (k) for the materials used in this work. Data for AlInP are the same as those applied in [Valdivia *et al.*, 2008] and the refractive index of GaInP was taken from [Ioffe Institute, 2011]. The SiO₂ and Si_xN_y were deposited in our laboratory using a parallel plate PECVD system with low pressure discharge sustained by RF electrical power supplies, adjusted to 13.56 MHz for high frequency or to 380 kHz for low frequency. For LFSiN deposition, the flow rate of silane, ammonia and nitrogen were 55, 5 and 1960 sccm, respectively. The pressure was 300 mTorr and the temperature 300°C.

Spectroscopic ellipsometry was used to characterize the optical properties of SiO₂ and Si_xN_y. The extinction coefficient of the standard high frequency PECVD silicon nitride

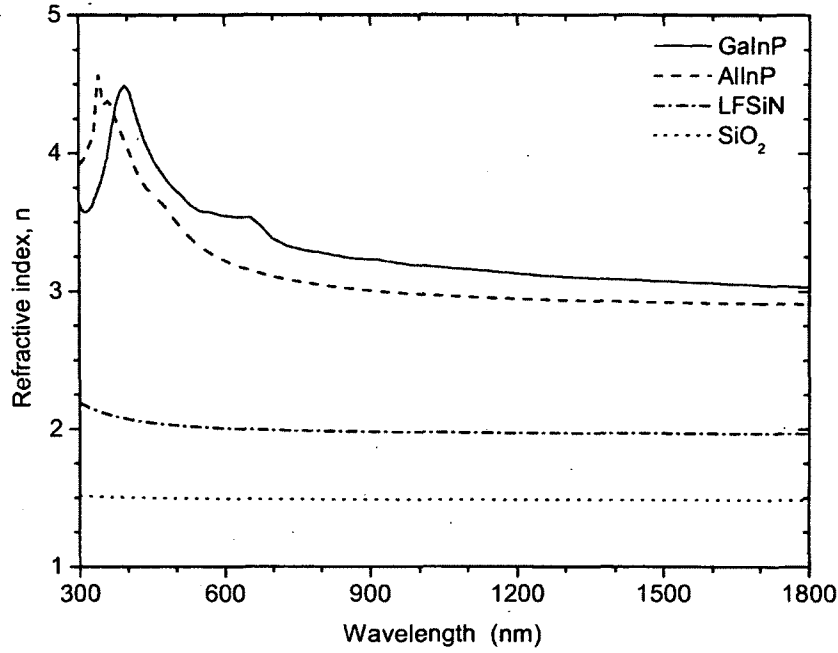


Figure 5.2 Refractive index of LFSiN and SiO₂ measured by ellipsometry as well as the refractive index of the other materials used in this work.

(HFSiN) has been added to Fig. 5.3 to show the lower absorption of LFSiN for a similar refractive index. At a wavelength of 650 nm the refractive index of the materials are 1.49, 2.00, 3.15 and 3.54 for SiO₂, LFSiN, AlInP and GaInP, respectively.

The internal quantum efficiency (IQE) of the III-V/Ge 3JSCs is estimated from external quantum efficiency measurements. The AM1.5D solar spectrum and the IQE of ML- and TL-3JSC designs are presented in Fig. 5.4. The potential short circuit current density J_{SC} for each subcell is calculated from the IQE to determine the limiting subcell under the AM1.5D solar spectrum (Table 5.1). The solar weighted reflectance R_w is used to quantify the performance of the ARC. It represents the percentage of incident light energy lost by reflection, weighted by the quantum efficiency of the cell and the solar spectrum :

$$R_w = \frac{\int \frac{I(\lambda)}{E(\lambda)} R(\lambda) IQE(\lambda) d\lambda}{\int \frac{I(\lambda)}{E(\lambda)} IQE(\lambda) d\lambda} \quad (5.8)$$

This equation is applied herein with the simplifying assumption that only light of perpendicular incidence is considered. While for standard fixed flat-plate photovoltaics the angle of incidence varies from 0° to 90° throughout the day, for a 2-axis tracking CPV system the angular distribution of irradiance is fixed by the geometry and design of the concentrating optics. Since this distribution is system dependent, these calculations neglect the

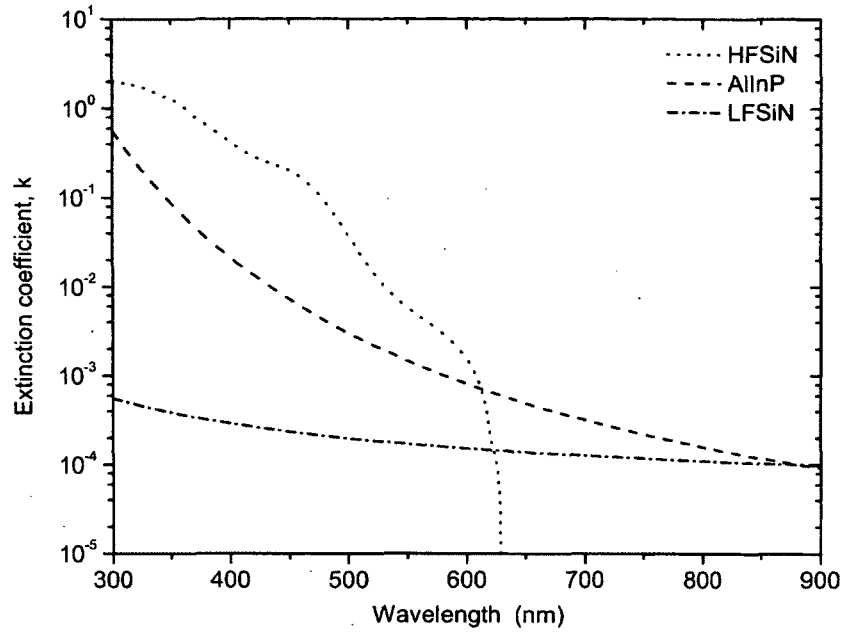


Figure 5.3 Extinction coefficient of LFSiN and standard HFSiN measured by ellipsometry for comparison of the absorption as well as extinction coefficient of AlInP.

Tableau 5.1 Short-circuit current density that could be produced by each subcell under AM1.5D solar spectrum

	J_{sc} (mA/cm ²)			Current ratio, top/middle
	Top subcell	Middle subcell	Bottom subcell	
ML-3JSC	14.3	12.7	20.7	1.12
TL-3JSC	13.1	14.1	20.6	0.93

light rays at non-normal incidence to keep them general. To account for a specific angular distribution of irradiance, the reader is directed to [Valdivia *et al.*, 2008].

5.3 Results and discussions

5.3.1 Antireflection coating for 3JSCs

The calculated reflectance spectra of an Air – SiO₂ – LFSiN – AlInP – GaInP structure optimized for ML-3JSC and TL-3JSC are presented in Fig. 5.5. The thicknesses of LFSiN and SiO₂ were chosen to maximize J_{sc} of the limiting subcell. Indeed, the reflectance shows a minimum between 700 and 900 nm in Fig. 5.5 (a) and between 300 and 700 nm in Fig. 5.5 (b).

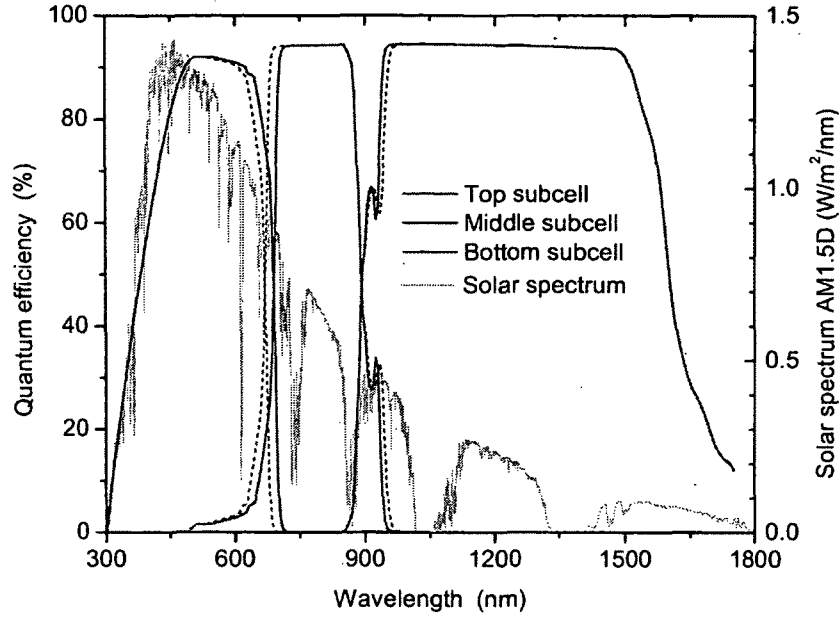


Figure 5.4 Internal quantum efficiencies of two GaInP/InGaAs/Ge 3JSC designs provided by Cyrium Technologies Inc. compared to the solar spectrum. Solid colored lines : ML-3JSC design. Dashed colored lines : TL-3JSC design.

The SiO₂/LFSiN 2L-ARC achieves very low R_W values of 0.4% and 1.5% for ML and TL cells, respectively, which is comparable to the published data on 2L-ARCs for MJSCs using MgF₂/ZnS or SiO₂/Ta₂O₅ structures shown in Table 5.2. The differences in R_W between the ARC material combinations shown in Table 5.2 are partly explained by the different structure model and quantum efficiency used in this work and in [Valdivia *et al.*, 2008]. Therefore, those data should only be used for general comparison of the performance.

Moreover, the results show that even when optimizing the reflectance only for the range of the limiting subcell, the other subcells do not suffer from significant reflection losses which would lead to a switch of the limiting subcell. In other words, a SiO₂/LFSiN 2L-ARC has a sufficiently large spectral effectiveness to achieve minimum reflection losses over the critical wavelength range of the top and middle subcell, as well as sufficiently low reflection losses over the rest of the spectrum.

It is noteworthy that a LFSiN single layer (1L)-ARC could be used for the ML- as well as TL-3JSC designs at the cost of a higher R_W over the range of the limiting subcell (2.5% and 3.6% for TL and ML cells, respectively). Moreover, because the 1L-ARC has a narrower spectral effectiveness than the 2L-ARC, the reflection losses over the range of the other subcells are greatly increased.

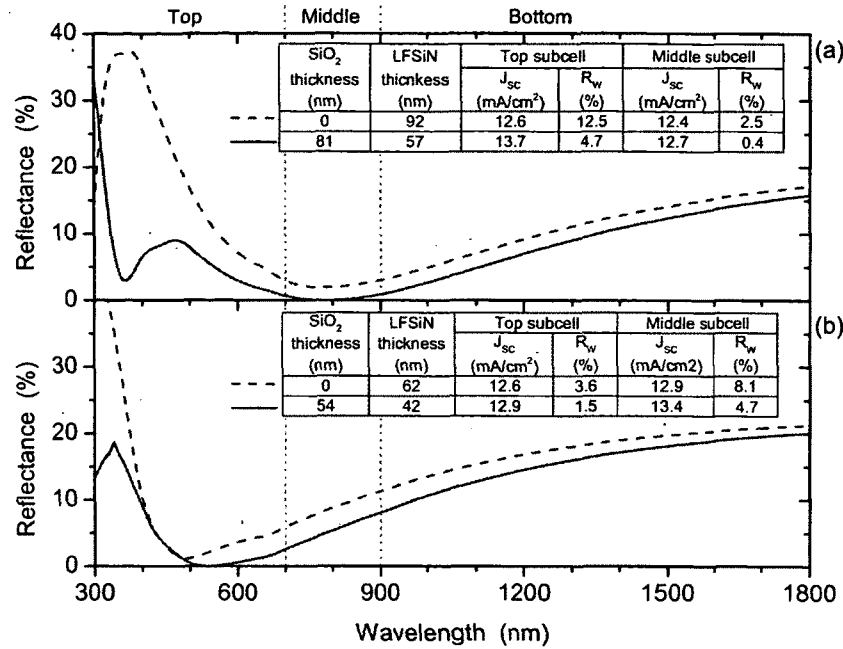


Figure 5.5 Calculated reflectance spectrum and performance data of LFSiN 1L-ARC and SiO₂/LFSiN 2L-ARC optimized for the ML-3JSC design in (a) and for the TL-3JSC design in (b).

Tableau 5.2 Solar weighted reflectance over the range of the top subcell for different ARC structures

Materials	Thicknesses (nm)	R _w for top subcell (%)	
SiO ₂ /LFSiN	54/42	1.5	
SiO ₂ /Ta ₂ O ₅	55/42	1.7	[4]
MgF ₂ /ZnS	82/44	1.6	[4]

In cases where top and middle subcells are current-matched, it is likely that the cell would benefit from an ARC that is optimized for a wider range. Figure 5.6 shows the reflectance of the SiO₂/LFSiN 2L-ARC that minimizes R_w for both, top and middle, subcells to 2.3%.

In some CPV systems the incidence medium is preferably matched with the glass of a secondary optical element (i.e. $n \approx 1.5$) in order to reduce the reflection losses caused by multiple discontinuities of the refractive index. In this case, the SiO₂ layer plays little to no role since it has approximately the same optical properties as the incidence medium. An optimized LFSiN 1L-ARC for a 3JSC encapsulated with BK7 glass [SCHOTT, 2012] is shown in Fig. 5.6, and allows a R_w value of 1.9% across the spectral range of top and middle subcells.

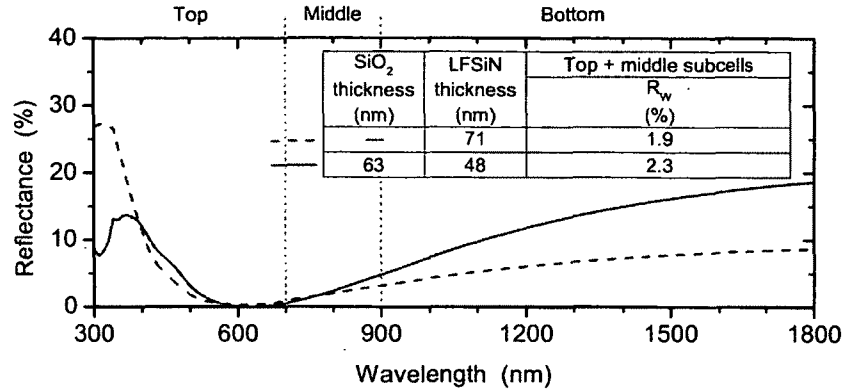


Figure 5.6 Calculated reflectance spectrum and performance data of SiO₂/LFSiN 2L-ARC matched with air and LFSiN 1L-ARC matched with glass, optimized for a 3JSC with current-matched top and middle subcells.

5.3.2 ARC's performance with varied parameters

To investigate the robustness of a PECVD SiO₂/LFSiN 2L-ARC in a fabrication line, we studied the effect of variations in thickness and refractive indices of the layers on the performance of the ARC. Figure 5.7 shows the increase of R_w of the middle subcell as a function of the thickness of SiO₂ and LFSiN in the vicinity of the optimal values for a minimized R_w of the middle subcell. The calculations were carried out for the ML-3JSC as an example, but similar conclusions can be deduced for the TL-3JSC. The results show that allowing a thickness tolerance of 5% from the optimal values, leads to an increase in R_w of 0.11% absolute (i.e. from 0.4% to 0.5%). Reducing the thickness tolerance to 2%, R_w increases by 0.03% absolute.

Figure 5.8 shows the increase of R_w of the middle subcell as a function of the refractive index variation of both SiO₂ and LFSiN in the vicinity of the values used for the optimization calculations. Adjusting the refractive index of both ARC layers with a tolerance of $\pm 5\%$, R_w could increase by 0.59% absolute (i.e. from 0.4% to nearly 1.0%). However, the refractive indices of PECVD SiO₂ and LFSiN can be controlled to within $\pm 0.5\%$ which would not introduce any significant R_w increase. Note that the optimal R_w is offset towards a higher LFSiN refractive index in Fig. 5.8 due to the fact that the silicon nitride used for the simulations has a lower refractive index relative to the estimated optimal value of 2.15 for a 2L-ARC for III-V/Ge 3JSCs [Valdivia *et al.*, 2008].

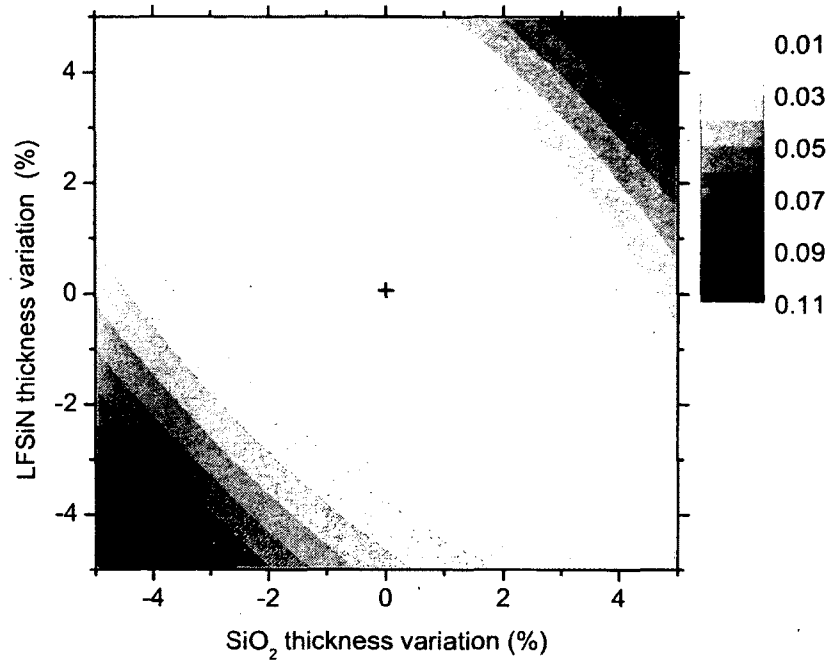


Figure 5.7 R_W of the middle subcell increase as a function of SiO_2 and LFSiN thickness variation in the vicinity of the optimal values of 81 and 57 nm respectively.

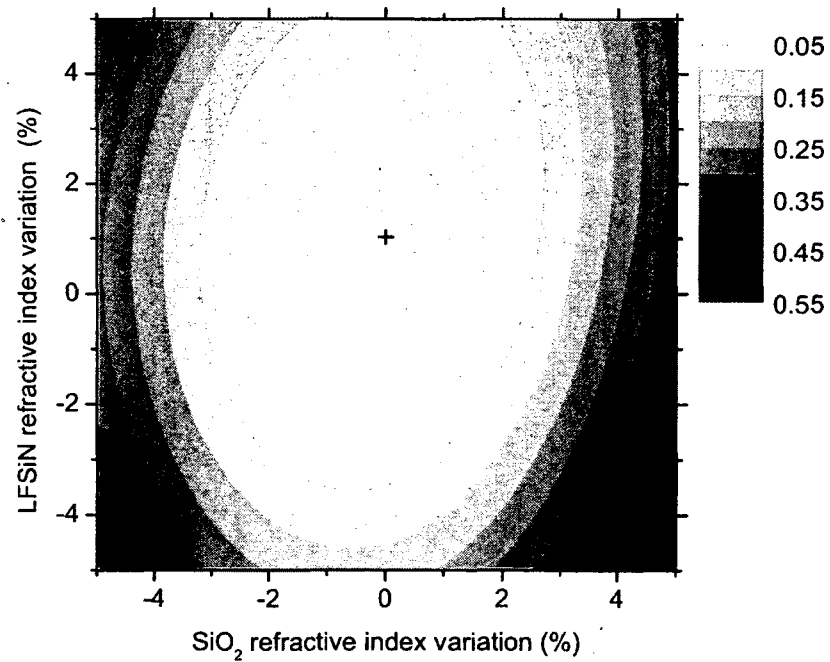


Figure 5.8 R_W of the middle subcell increase as a function of SiO_2 and LFSiN refractive index variation in the vicinity of the typical values.

5.4 Conclusion

The simulated performance of a SiO₂/LFSiN antireflection coating for III-V/Ge triple junction solar cells using real material optical properties was presented. This ARC is effective in minimizing the reflection losses over the wavelength range of the limiting subcell for both top and middle subcell-limited triple-junction solar cells. According to the simulation results, the performance of ARC withstands realistic variations of parameters of PECVD films (thickness and refractive index), resulting from possible deposition process fluctuations. Overall, it was shown that low absorption Si_xN_y deposited by low frequency PECVD can provide a complete and multipurpose coating for multi-junction solar cells acting as an effective ARC with the potential of surface passivation/encapsulation. PECVD technique, which is widely used in the silicon solar cell industry, also offers the advantage of low cost at large scale deposition of thin films. Future work will include simulation of the full multi-junction structure and an experimental characterization of the resultant optimal ARC designs.

Acknowledgment

The authors would like to thank G. Aers and D. Poitras from the Institute for Microstructural Sciences at the National Research Council of Canada for providing material data for AlInP, S. Schicho from the CRN² for useful discussions, and the CRN² staff.

CHAPITRE 6

Conclusion

Ce travail de maîtrise démontre la possibilité d'utiliser le nitrure de silicium déposé par PECVD basse fréquence pour améliorer la technique de fabrication d'ARC pour les cellules triple-jonction III-V/Ge. Il y a très peu de travaux dans la littérature sur les ARC pour cellules solaires multi-jonction. Parmi les matériaux utilisés pour ces revêtements le nitrure de silicium n'a pas été étudié. L'absorption dans l'UV du Si_xN_y standard ainsi que son indice de réfraction plus faible que certains matériaux sont probablement les raisons qui expliquent ce manque d'intérêt jusqu'à maintenant. Par contre, ce matériau est très utilisé comme ARC et couche de passivation/encapsulation pour les cellules solaires simples jonction en Si. Plusieurs avantages font du Si_xN_y déposé par PECVD une solution attrayante, notamment :

- Ses propriétés de barrière contre l'humidité et autres contaminations environnementales,
- Son potentiel de passivation de la surface des semiconducteurs du Si_xN_y PECVD,
- Sa déposition à faible coût sur grandes surfaces par PECVD.

En utilisant une technique optimisée de déposition PECVD basse fréquence, le LFSiN présente très peu d'absorption même aux courtes longueurs d'onde jusqu'à 300 nm. Par simulations, les performances optiques d'ARC à base de LFSiN et dans certains cas avec du SiO_2 ont été calculées. La méthode de simulation permet de calculer la réflectance moyenne sur une certaine plage de longueurs d'onde pondérée par le spectre solaire et l'efficacité quantique de la cellule. À l'aide de la méthode de simulation décrite dans ce travail, il est possible d'optimiser l'ARC pour obtenir le meilleur *current matching* possible pour différentes situations de spectre solaires et différentes cellules. Il a été démontré qu'un ARC double couche SiO_2 /LFSiN offre des performances optiques comparables à d'autres ARC plus utilisés pour les cellules multi-jonction. Typiquement, les couches ont des épaisseurs entre 50 et 100 nm selon si la cellule solaire est limitée par la sous-cellule du haut ou du milieu. Pour étudier le potentiel du LFSiN comme ARC dans d'autres cas d'applications réelles, un ARC optimisé pour des cellules triple-jonction III-V/Ge avec les sous-cellules du haut et du milieu exactement *current-matched* ainsi qu'un ARC simple couche en LFSiN pour une cellule en contact avec du verre au lieu de l'air ont été calculés. De plus, la méthode de simulation offre la possibilité d'évaluer la stabilité de la performance des ARC

suivant des variations d'épaisseurs et de propriétés optiques des couches. Ainsi, il a été calculé que la performance de l'ARC double couche $\text{SiO}_2/\text{LFSiN}$ est relativement stable suivant des variations possibles lors de la déposition par PECVD.

Enfin, ce travail ouvre la voie à une multitude de projets sur les ARC pour cellules solaires multi-jonction, notamment :

- Inclure la structure complète de la cellule solaire (épaisseur et propriétés optiques de chaque couche) dans le modèle pour améliorer la précision de la simulation,
- Confronter les résultats de simulations avec des mesures expérimentales de l'ARC,
- Étudier une ARC triple couche plus performante sur large bande avec des matériaux à haut indice et faible indice,
- Étudier l'effet de la passivation de la surface de la couche fenêtre sur les performances des cellules multi-jonction.

Plus la performance des cellules solaires augmentera, plus la pression sur les performances de son ARC seront importantes, car les cellules multi-jonction absorberont sur une plus large bandes et seront mieux *current-matched*. C'est-à-dire qu'une perte par réflexion de quelques % dans l'infrarouge par exemple ne sera plus «amortie» par un surplus de courant comme c'est le cas pour les 3JSC III-V/Ge. Le courant total de la cellule serait diminué. Même pour les cellules solaires qui détiennent les records du monde d'efficacité à plus de 42%, les pertes par réflexions sont d'environ 5% absolus. Dans un domaine où l'augmentation d'efficacité d'année en année est inférieur à 1%, l'étude des ARC pour cellules solaires multi-jonction est donc un enjeu important pour le futur du CPV. De plus, un ARC à base de Si_xN_y a l'avantage d'être un revêtement multi-fonction qui inclut potentiellement la passivation et l'encapsulation.

ANNEXE A

Méthode matricielle et vecteur de Poynting pour l'étude optique des structures multicouche

La méthode matricielle permet de calculer la propagation du champ électrique incident sur une structure multicouche en utilisant une multiplication de matrices de transfert pour chaque interface et chaque couche. Par cette méthode, le calcul de R et T donne exactement les mêmes résultats qu'avec la méthode de Rouard décrite dans les chapitres 3 et 5. De plus, la méthode matricielle permet de calculer l'absorption dans n'importe quelle couche de la structure. Ceci est très intéressant entre autres pour étudier l'effet de l'absorption dans l'ARC. De plus, l'angle d'incidence ainsi que la polarisation de la lumière (s , p ou non-polarisée) sont inclus dans la démarche décrite dans cette annexe.

A.1 Onde plane et système de coordonnées

On suppose une onde plane électromagnétique incidente sur une surface dans le plan $x-y$. Le système de coordonnées est choisi pour que la direction de propagation du champ électrique soit toujours dans le plan $x-z$. La figure A.1 montre un empilement de m couches planaires, les champs électriques incident, réfléchi et transmis ainsi que le système de coordonnées utilisé.

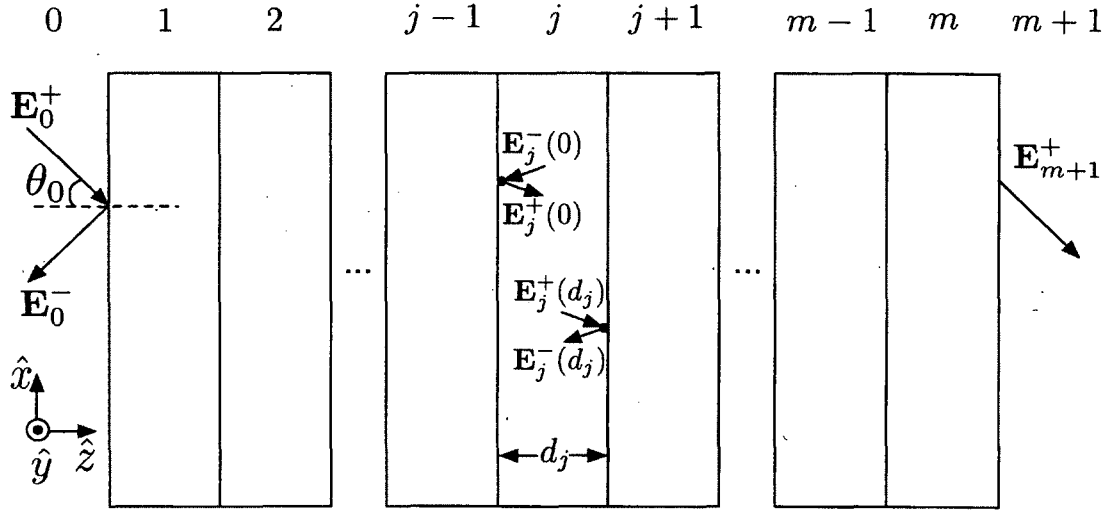


Figure A.1 Schéma d'un champ électrique incident sur une structure multicouche avec m couches dans le système de coordonnées cartésiennes. Le milieu 0 est le superstrat et le milieu $m+1$ est le substrat. Les flèches associées aux différents champs électriques montre la direction de propagation du champ (i.e. la direction du vecteur d'onde \mathbf{k}) et non la direction du champ électrique. $E_j^+(0)$ est le champ électrique se propageant dans la direction des z positifs à l'interface de gauche de la couche j et $E_j^+(d_j)$ à l'interface de droite; de façon similaire pour les champs se propageant dans la direction des z négatifs $E_j^-(0)$ et $E_j^-(d_j)$.

Il est important de noter que les champs électriques représentés sur la figure A.1 sont le résultat des sommes infinies de toutes les ondes réfléchies et transmises à chaque interface de la structure. En tout point, le champ électrique est la somme des ondes + et - :

$$\mathbf{E}_j(z) = \mathbf{E}_j^+(z) + \mathbf{E}_j^-(z), \quad (\text{A.1})$$

où j est un nombre entier de 0 à $m+1$ et z prendra la valeur 0 pour le champ à l'interface gauche de la couche ou d_j pour le champ à l'interface droite. Si l'onde est polarisée s , \mathbf{E}_j a seulement une composante en $\pm \hat{\mathbf{y}}$ et si elle est polarisée p , \mathbf{E}_j est dans le plan x - z . Les vecteurs d'onde qui indiquent la direction de propagation sont de la forme :

$$\mathbf{k}_j^+ = \frac{2\pi \mathbf{n}_j}{\lambda} (\cos(\theta_j) \hat{\mathbf{z}} + \sin(\theta_j) \hat{\mathbf{x}}), \quad (\text{A.2})$$

$$\mathbf{k}_j^- = \frac{2\pi \mathbf{n}_j}{\lambda} (-\cos(\theta_j) \hat{\mathbf{z}} + \sin(\theta_j) \hat{\mathbf{x}}), \quad (\text{A.3})$$

où $\mathbf{n}_j = n_j + i\kappa_j$ (à la différence de la définition $n_j - i\kappa_j$ utilisée dans la méthode de Rouard dans les chapitres 3 et 5) est l'indice de réfraction complexe du milieu j , λ est la longueur d'onde de la lumière dans le vide et θ_j est l'angle entre la direction de propagation du champ dans la couche j et la normale à la surface. L'angle est calculé par la loi de Snell :

$$n_0 \sin \theta_0 = n_j \sin \theta_j \quad (\text{A.4})$$

A.2 Réflexion et transmission à une interface

Le champ électromagnétique à une interface entre deux milieux d'indices différents est en partie réfléchi et en partie transmis (il subit alors une réfraction si l'angle d'incidence est non nul). À l'aide des équations de Maxwell et des conditions de continuités, [Heavens, 1991] dérive les équations connues sous le nom de coefficients de Fresnel pour les coefficients de réflexion et de transmission de l'amplitude du champ électromagnétique (polarisée s ou p) incident avec un angle θ sur une interface entre un milieu d'indice \mathbf{n}_{j-1} et un milieu d'indice \mathbf{n}_j :

$$r_{s,j} = \frac{\mathbf{n}_{j-1} \cos \theta_{j-1} - \mathbf{n}_j \cos \theta_j}{\mathbf{n}_{j-1} \cos \theta_{j-1} + \mathbf{n}_j \cos \theta_j}, \quad (\text{A.5})$$

$$t_{s,j} = \frac{2\mathbf{n}_{j-1} \cos \theta_{j-1}}{\mathbf{n}_{j-1} \cos \theta_{j-1} + \mathbf{n}_j \cos \theta_j}, \quad (\text{A.6})$$

$$r_{p,j} = \frac{\mathbf{n}_j \cos \theta_{j-1} - \mathbf{n}_{j-1} \cos \theta_j}{\mathbf{n}_j \cos \theta_{j-1} + \mathbf{n}_{j-1} \cos \theta_j}, \quad (\text{A.7})$$

$$t_{p,j} = \frac{2\mathbf{n}_{j-1} \cos \theta_{j-1}}{\mathbf{n}_j \cos \theta_{j-1} + \mathbf{n}_{j-1} \cos \theta_j}. \quad (\text{A.8})$$

A.3 Méthode des matrices de transfert

La méthode des matrices de transfert est bien décrite dans de nombreux ouvrages, par exemple [Petterson *et al.*, 1999] et [Byrnes, 2012]. La propagation de l'onde électromagnétique à l'interface entre deux milieux est décrite par une matrice de transfert d'interface :

$$I_j = \frac{1}{t_j} \begin{bmatrix} 1 & r_j \\ r_j & 1 \end{bmatrix}, \quad (\text{A.9})$$

tel que

$$\begin{bmatrix} E_{j-1}^+(d_{j-1}) \\ E_{j-1}^-(d_{j-1}) \end{bmatrix} = I_j \begin{bmatrix} E_j^+(0) \\ E_j^-(0) \end{bmatrix}. \quad (\text{A.10})$$

La matrice de transfert d'une couche est :

$$L_j = \begin{bmatrix} e^{-i\delta_j} & 0 \\ 0 & e^{i\delta_j} \end{bmatrix}, \quad (\text{A.11})$$

où

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{n}_j \cos \theta_j, \quad (\text{A.12})$$

est l'épaisseur optique de la couche j et tel que

$$\begin{bmatrix} E_j^+(0) \\ E_j^-(0) \end{bmatrix} = L_j \begin{bmatrix} E_j^+(d_j) \\ E_j^-(d_j) \end{bmatrix}. \quad (\text{A.13})$$

En multipliant toutes les matrices de transfert de chaque couche et interface, on obtient la matrice de transfert de la structure :

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \left(\prod_{\nu=1}^m I_\nu L_\nu \right) \cdot I_{m+1}, \quad (\text{A.14})$$

tel que,

$$\begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_{m+1}^+ \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.15})$$

$E_{m+1}^- = 0$ puisqu'aucune lumière n'arrive du substrat vers les \hat{z} négatifs. Ainsi, les coefficients de réflexion et transmission complexes de la structure sont calculés à partir des éléments de la matrice M :

$$r = \frac{E_0^-}{E_0^+} = \frac{M_{21}}{M_{11}}, \quad (\text{A.16})$$

$$t = \frac{E_{m+1}^+}{E_0^+} = \frac{1}{M_{11}}. \quad (\text{A.17})$$

A.4 Calcul du champ électrique dans une couche spécifique d'un empilement

La méthode matricielle décrite dans la plupart des ouvrages d'optique permet de calculer les ondes réfléchies et transmises en fonction de l'onde incidente pour une structure multicouche, mais un approfondissement de la méthode est nécessaire pour calculer le champ électromagnétique en un point précis dans une couche de la structure. Cette démarche s'inspire de [Petterson *et al.*, 1999] et consiste à diviser le système en deux parties séparées par la couche j . La matrice de transfert du système s'écrit alors :

$$M = M'_j L_j M''_j, \quad (\text{A.18})$$

où

$$M'_j = \begin{bmatrix} M'_{j11} & M'_{j12} \\ M'_{j21} & M'_{j22} \end{bmatrix} = \left(\prod_{\nu=1}^{j-1} I_\nu L_\nu \right) \cdot I_j, \quad (\text{A.19})$$

$$M''_j = \begin{bmatrix} M''_{j11} & M''_{j12} \\ M''_{j21} & M''_{j22} \end{bmatrix} = \left(\prod_{\nu=j+1}^m I_\nu L_\nu \right) \cdot I_{m+1}. \quad (\text{A.20})$$

On obtient ainsi un système de 6 équations pour calculer le champ à l'intérieur d'une couche j :

$$\begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} = M'_j \begin{bmatrix} E_j^+(0) \\ E_j^-(0) \end{bmatrix}, \quad (\text{A.21})$$

$$\begin{bmatrix} E_j^+(0) \\ E_j^-(0) \end{bmatrix} = L_j \begin{bmatrix} E_j^+(d_j) \\ E_j^-(d_j) \end{bmatrix}, \quad (\text{A.22})$$

$$\begin{bmatrix} E_j^+(d_j) \\ E_j^-(d_j) \end{bmatrix} = M''_j \begin{bmatrix} E_{m+1}^+ \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.23})$$

Le système d'équations A.21, A.22 et A.23 se résout à :

$$\frac{E_0^-}{E_0^+} = \frac{M'_{j21} L_{j11} M''_{j11} + M'_{j22} L_{j22} M''_{j21}}{Q}, \quad (\text{A.24})$$

$$\frac{E_{m+1}^+}{E_0^+} = \frac{1}{Q}, \quad (\text{A.25})$$

$$\frac{E_j^+(0)}{E_0^+} = \frac{L_{j11} M''_{j11}}{Q}, \quad (\text{A.26})$$

$$\frac{E_j^-(0)}{E_0^+} = \frac{L_{j22} M''_{j21}}{Q}, \quad (\text{A.27})$$

$$\frac{E_j^+(d_j)}{E_0^+} = \frac{M''_{j11}}{Q}, \quad (\text{A.28})$$

$$\frac{E_j^-(d_j)}{E_0^+} = \frac{M''_{j21}}{Q}, \quad (\text{A.29})$$

où

$$Q = M'_{j11} L_{j11} M''_{j11} + M'_{j12} L_{j22} M''_{j21}. \quad (\text{A.30})$$

A.5 Traitement du vecteur de Poynting et calcul de R, T et A

Les coefficients donnés par les équations A.24 à A.29 donnent le rapport entre l'amplitude des champs électromagnétiques calculés (E_0^- , E_{m+1}^+ , $E_j^+(0)$, $E_j^-(0)$, $E_j^+(d_j)$, $E_j^-(d_j)$) et l'amplitude du champ électromagnétique incident. Pour calculer la réflectance R , la transmittance T , et l'absorptance A qui sont des rapport de puissance lumineuse, le vecteur de Poynting \mathbf{S} est utilisé. La démarche suivante est inspiré de [Byrnes, 2012] et est en accord avec les équations dérivées par [Deparis, 2011]. La composante normale de \mathbf{S} , i.e. $\mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{z}}$, représente le flux net de puissance lumineuse dans la direction positive. Pour une onde périodique sinusoïdale, la moyenne dans le temps de \mathbf{S} sur un cycle est :

$$\langle \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E}^* \times \mathbf{H}]. \quad (\text{A.31})$$

La forme de \mathbf{E} et du champ magnétique \mathbf{H} dépend de la polarisation. En utilisant la relation $\mathbf{H} \propto \mathbf{k} \times \mathbf{E}$ et les équation A.2 et A.3 on a pour la polarisation s :

$$\mathbf{E} = E^+ \hat{\mathbf{y}} + E^- \hat{\mathbf{y}} \quad (\text{A.32})$$

$$\mathbf{H} \propto \mathbf{n} E^+ (-\cos(\theta) \hat{\mathbf{x}} + \sin(\theta) \hat{\mathbf{z}}) + \mathbf{n} E^- (\cos(\theta) \hat{\mathbf{x}} + \sin(\theta) \hat{\mathbf{z}}) \quad (\text{A.33})$$

$$\frac{\langle \mathbf{S} \rangle \cdot \hat{\mathbf{z}}}{\langle \mathbf{S}_{\text{inc}} \rangle \cdot \hat{\mathbf{z}}} = \frac{\text{Re}[\mathbf{n} \cos(\theta) (E^+ + E^-)^* (E^+ - E^-)]}{n_0 \cos \theta_0}, \quad (\text{A.34})$$

où \mathbf{S}_{inc} est la puissance lumineuse incidente en définissant $|\mathbf{E}_0^+|^2 = 1$. De façon similaire pour la polarisation p :

$$\mathbf{E} = E^+ (\cos(\theta) \hat{\mathbf{x}} - \sin(\theta) \hat{\mathbf{z}}) + E^- (-\cos(\theta) \hat{\mathbf{x}} - \sin(\theta) \hat{\mathbf{z}}) \quad (\text{A.35})$$

$$\mathbf{H} \propto \mathbf{n} E^+ \hat{\mathbf{y}} + \mathbf{n} E^- \hat{\mathbf{y}} \quad (\text{A.36})$$

$$\frac{\langle \mathbf{S} \rangle \cdot \hat{\mathbf{z}}}{\langle \mathbf{S}_{\text{inc}} \rangle \cdot \hat{\mathbf{z}}} = \frac{\text{Re}[\mathbf{n} \cos(\theta) (E^+ + E^-) (E^+ - E^-)^*]}{n_0 \cos \theta_0}. \quad (\text{A.37})$$

En utilisant l'équation A.34 ou A.37 selon la polarisation et les équations A.24 à A.29, on calcule R , T , A et l'absorptance d'une couche j (A_j) :

$$R = \left| \frac{M'_{j21} L_{j11} M''_{j11} + M'_{j22} L_{j22} M''_{j21}}{Q} \right|^2, \quad (\text{A.38})$$

$$T = \left| \frac{1}{Q} \right|^2 \frac{\text{Re}[\mathbf{n}_{m+1} \cos(\theta_{m+1})]}{n_0 \cos(\theta_0)} \quad \text{pour la polarisation } s, \quad (\text{A.39})$$

$$T = \left| \frac{1}{Q} \right|^2 \frac{\text{Re}[\mathbf{n}_{m+1} \cos(\theta_{m+1})^*]}{n_0 \cos(\theta_0)} \quad \text{pour la polarisation } p, \quad (\text{A.40})$$

$$A = 1 - R - T, \quad (\text{A.41})$$

$$\begin{aligned} A_j &= \frac{\langle \mathbf{S}_j(\mathbf{0}) \rangle \cdot \hat{\mathbf{z}} - \langle \mathbf{S}_j(\mathbf{d}_j) \rangle \cdot \hat{\mathbf{z}}}{\langle \mathbf{S}_{\text{inc}} \rangle \cdot \hat{\mathbf{z}}} \\ &= \frac{\text{Re} \left[\mathbf{n} \cos(\theta) \left(\frac{L_{j11} M''_{j11}}{Q} + \frac{L_{j22} M''_{j21}}{Q} \right)^* \left(\frac{L_{j11} M''_{j11}}{Q} - \frac{L_{j22} M''_{j21}}{Q} \right) \right]}{n_0 \cos \theta_0} \\ &\quad - \frac{\text{Re} \left[\mathbf{n} \cos(\theta) \left(\frac{M''_{j11}}{Q} + \frac{M''_{j21}}{Q} \right)^* \left(\frac{M''_{j11}}{Q} - \frac{M''_{j21}}{Q} \right) \right]}{n_0 \cos \theta_0} \quad \text{pour la polarisation } s, \end{aligned} \quad (\text{A.42})$$

$$\begin{aligned} A_j &= \frac{\text{Re} \left[\mathbf{n} \cos(\theta)^* \left(\frac{L_{j11} M''_{j11}}{Q} + \frac{L_{j22} M''_{j21}}{Q} \right) \left(\frac{L_{j11} M''_{j11}}{Q} - \frac{L_{j22} M''_{j21}}{Q} \right)^* \right]}{n_0 \cos \theta_0} \\ &\quad - \frac{\text{Re} \left[\mathbf{n} \cos(\theta)^* \left(\frac{M''_{j11}}{Q} + \frac{M''_{j21}}{Q} \right) \left(\frac{M''_{j11}}{Q} - \frac{M''_{j21}}{Q} \right)^* \right]}{n_0 \cos \theta_0} \quad \text{pour la polarisation } p. \end{aligned} \quad (\text{A.43})$$

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Aiken, D. J. (2000a). Antireflection coating design for series interconnected multi-junction solar cells. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, volume 8, numéro 6, p. 563–570.
- Aiken, D. J. (2000b). High performance anti-reflection coatings for broadband multi-junction solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, volume 64, p. 393–404.
- Burgess, E. et Pritchard, D. (1978). Performance of a one kilowatt concentrator photovoltaic array utilizing active cooling. *Proceedings of the 13th Photovoltaic Specialists Conference*, p. 1121–1124.
- Byrnes, S. (2012). *Multilayer thin film optics calculator*. sjbyrnes.com/fresnel_manual.pdf (page consultée le 06 2012).
- Chang, C.-P., Flamm, D. L., Ibbotson, D. E. et Mucha, J. A. (1988). Frequency effects and properties of plasma deposited fluorinated silicon nitride. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, volume 6, numéro 2, p. 524–532.
- Concentrix Solar (2011). *Concentrix Solar*. soitec.com/en/technologies/concentrix/components/ (page consultée le 11 2011).
- Cotal, H., Fetzer, C., Boisvert, J., Kinsey, G., King, R., Hebert, P., Yoon, H. et Karam, N. (2009). III-V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, volume 2, numéro 2, p. 174–192.
- Deparis, O. (2011). Poynting vector in transfer-matrix formalism for the calculation of light absorption profile in stratified isotropic optical media. *Optics Letters*, volume 36, numéro 20, p. 3960–2.
- Doshi, P., Jellison, G. E. et Rohatgi, A. (1997). Characterization and optimization of absorbing plasma-enhanced chemical vapor deposited antireflection coatings for silicon photovoltaics. *Applied Optics*, volume 36, numéro 30, p. 7826–7837.
- Gombert, A., Heile, I., Wüllner, J., Gerstmaier, T., van Riesen, S., Gerster, E., Röttger, M. et Lerchenmüller, H. (2010). Recent progress in concentrator photovoltaics. volume 7725. SPIE, p. 772508.
- Gorin, A., Jaouad, A., Grondin, E., Aimez, V. et Charette, P. (2008). Fabrication of silicon nitride waveguides for visible-light using PECVD : a study of the effect of plasma frequency on optical properties. *Opt. Express*, volume 16, numéro 18, p. 13509–13516.
- Heavens, O. S. (1991). *Optical Properties of Thin Solid Films*. Dover Publications, New York, 288 p.
- Hezel, R. (1997). Recent progress in mis solar cells. *Prog. Photovolt., Res. Appl. (UK)*, volume 5, numéro 2, p. 109 – 120.

- Ioffe Institute (2011). *Ioffe Institute Semiconductors Physical Properties*. www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaInP/optic.html (page consultée le 06-2011).
- Jaouad, A. et Aimez, V. (2006). Passivation of air-exposed AlGaAs using low frequency plasma-enhanced chemical vapor deposition of silicon nitride. *Applied Physics Letters*, volume 89, numéro 9, p. 092125.
- Jaouad, A., Aimez, V. et Aktik, C. (2004). GaAs passivation by low-frequency plasma-enhanced chemical vapour deposition of silicon nitride. *Electronics Letters*, volume 40, numéro 16, p. 1024–1026.
- Jaus, J., Bett, A., Reinecke, H. et Weber, E. (2011). Reflective secondary optical elements for fresnel lens based concentrator modules. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, volume 19, numéro 5, p. 580–590.
- Karunagaran, B., Chung, S., Velumani, S. et Suh, E.-K. (2007). Effect of rapid thermal annealing on the properties of PECVD SiNx thin films. *Materials Chemistry and Physics*, volume 106, numéro 1, p. 130 – 133.
- NREL (2012). *Reference Solar Spectral Irradiance : Air Mass 1.5*. <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/> (page consultée le 01 2012).
- NREL NCPV (2012). *NREL - The National Center for Photovoltaics*. <http://www.nrel.gov/ncpv/> (page consultée le 05 2012).
- Petterson, L. A. A., Roman, L. S. et Inganäs, O. (1999). Modeling photocurrent action spectra of photovoltaic devices based on organic thin films. *Journal of Applied Physics*, volume 86, numéro 1, p. 487–496.
- SCHOTT (2012). *SCHOTT Optical Glass Data Sheet-Catalog*. www.us.schott.com/advanced_optics/english/our_products/materials/data_tools/index.html (page consultée le 03 2012).
- Solar Junction (2011). *Optics*. optics.org/news/2/4/22 (page consultée le 11 2011).
- Solar Systems (2011). *Solar Systems*. solarsystems.com.au/technology-2/cpv-systems-overview/ (page consultée le 11 2011).
- Tommila, J., Polojärvi, V., Aho, A., Tukiainen, A., Viheriälä, J., Salmi, J., Schramm, A., Kontio, J., Turtiainen, A., Niemi, T. et Guina, M. (2010). Nanostructured broadband antireflection coatings on AlInP fabricated by nanoimprint lithography. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, volume 94, numéro 10, p. 1845 – 1848.
- Valdivia, C. E., Desfonds, E., Masson, D., Fafard, S., Carlson, A., Cook, J., Hall, T. J. et Hinzer, K. (2008). Optimization of antireflection coating design for multijunction solar cells and concentrator systems. Dans *Photonics North 2008*. volume 7099. Proc. SPIE, p. 709915.
- Wojtczuk, S., Chiu, P., Zhang, X., Derkacs, D., Harris, C., Pulver, D. et Timmons, M. (2010). InGaP/GaAs/InGaAs 41% concentrator cells using bi-facial epigrowth. Dans *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. p. 1259 – 1264.

- Yamada, N., Kim, O. N., Tokimitsu, T., Nakai, Y. et Masuda, H. (2011). Optimization of anti-reflection moth-eye structures for use in crystalline silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, volume 19, numéro 2, p. 134–140.

